

Министерство образования и науки Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

В.Ш. СУЛАБЕРИДЗЕ, В.И. ЮЛИШ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЙ
ЧАСТЬ 2
ЭТАЛОНЫ И ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Санкт-Петербург

2011 г.

Сулаберидзе В.Ш., Юлиш В.И.

Даны основные понятия теории измерений, понятия о средстве измерений, измерительном сигнале, его преобразовании, передачи, обработки и хранении, приведены положения теоретической метрологии, изложены основы теории погрешности измерения и концепции неопределенности результата измерения, описаны эталоны основных единиц физических величин и схемы передачи размеров единиц физических величин от установок наивысшей точности рабочим средствам измерений, приведены принципы действия, конструкции и метрологические характеристики первичных преобразователей различных физических величин, приведены сведения о конструкционных и функциональных материалах датчиков, рассмотрено современное состояние и тенденции развития датчиков и сенсоров в инновационных отраслях экономики и научных исследованиях.

Предназначено для студентов факультета Н, изучающих дисциплины «Физические основы получения информации» по направлению «Приборостроение» и «Физические основы измерений и эталоны» по направлению «Стандартизация и метрология» в соответствии с ФГОС-3.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Объекты измерений. Отношения, в которых физические объекты проявляют свои свойства

Основой познания действительности являются наблюдения: пассивное наблюдение – созерцание, активное наблюдение – эксперимент.

Наблюдение, в процессе которого устанавливаются количественные отношения измеряемой величины с ее единицей с целью получения значения величины, составляет сущность измерения. Таким образом, измерение есть акт познания действительности.

Система, явление или процесс могут быть объектами измерений. Они обладают свойствами, для количественной характеристики которых вводится понятие величины. Под *свойством* при этом понимают качество, признак, проявляющийся во взаимодействиях и устанавливающий отношения между объектами действительности.

Различают *реальные* (физические измеряемые и нефизические оцениваемые) и *идеальные* (математические) величины.

Физические объекты (A, B, C) проявляют свои свойства X в отношениях: эквивалентности, порядка и аддитивности.

Отношения эквивалентности:

- а) дихотомии (сходства и различий): $X(A)=X(B)$ или $X(A)\neq X(B)$;
- б) симметричности: если $X(A)=X(B)$, то $X(B)=X(A)$;
- в) транзитивности по качеству (переход симметричности): если $X(A)=X(B)$ и $X(B)=X(C)$, то $X(A)=X(C)$.

Отношения порядка:

- а) антисимметричности: если $X(A)>X(B)$, то $X(B)<X(A)$;
- б) транзитивности по интенсивности свойства (переход отношения порядка): если $X(A)>X(B)$ и $X(B)>X(C)$, то $X(A)>X(C)$.

Отношения аддитивности:

- а) монотонности: если $X(A)=X(C)$ и $X(B)>0$, то $X(A)+X(B)>X(C)$;
- б) коммутативности: $X(A)+X(B)=X(B)+X(A)$;
- в) дистрибутивности: $X(A)+X(B)=X(A+B)$;
- г) ассоциативности: $[X(A)+X(B)]+X(C)=X(A)+[X(B)+X(C)]$.

Свойство, проявляющее себя только в отношениях эквивалентности, может быть обнаружено, классифицировано (шкала классификаций или наименований), подвергнуто контролю (установление соответствия между состоянием объекта и нормой) по классам свойств эквивалентности и отражено числом. Основным информативным параметром совокупности объектов с отношениями эквивалентности является их количество, определяемое путем счета (определение численности однотипных по свойству объектов).

Свойство, проявляющее себя в отношениях эквивалентности и порядка, называют интенсивной величиной, которая может быть обнаружена, классифицирована по интенсивности, подвергнута контролю, количественно оценена (ей приписано число) числом из убывающего (возрастающего) ряда. Интенсивную величину называют физической величиной, имеющей размер в шкалах порядка или интервалов (разностей).

Свойство, проявляющее себя в отношениях эквивалентности, порядка и аддитивности, может быть обнаружено, классифицировано, подвергнуто контролю и измерено. В этом случае говорят об экстенсивной величине. Именно при рассмотрении экстенсивных величин возникают понятия: измерение, единица величины. При переходе отношений эквивалентности к отношениям аддитивности измерения становятся все более высокого порядка.

1.2. Понятие о физической величине. Шкалы, единицы и системы единиц физических величин

Физическая величина (ФВ) – свойство физического объекта (системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них (РМГ 29-99). По международной терминологии в метрологии физическая величина определяется как «признак (атрибут) явления, тела или вещества, который может выделяться качественно и определяться количественно».

Шкала физической величины – упорядоченная последовательность значений ФВ, принятая соглашением на основании точных измерений.

Различают 5 основных типов шкал измерений:

1. Шкала наименований (шкала классификации). Используется для классификации эмпирических объектов со свойствами эквивалентности, но не ФВ! Пример: шкала цветности.
2. Шкала порядка (шкала рангов). Шкала монотонна, но в ней нет единицы измерения (нет отношений кратности). Эти шкалы условны. Примеры: шкала Бофорта, шкалы твердости. На шкалах порядка производится условное оценивание величины.
3. Шкала интервалов (шкала разностей). Эта шкала состоит из основных интервалов, имеет точку условного нуля и единицу измерения. Примеры: летоисчисление, температурные шкалы. Шкала интервалов может быть задана реперными точками (например, температурные шкалы).

4. Шкала отношений (пропорциональные и аддитивные). Примеры: масса (аддитивная), абсолютная температура (пропорциональная). Естественный «0» и единица измерений по соглашению. Именно в этих шкалах существует основное уравнение измерений (будет пояснено далее).

5. Абсолютная шкала – шкала отношений с естественным определением единицы измерения ФВ. Это шкалы относительных величин.

Измеряемой физической величиной называется физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи.

В последующем мы будем обращаться к термину *измерительная задача*, поэтому приведем здесь его определение по РМГ 29-99.

Измерительная задача – задача, заключающаяся в определении значения физической величины с требуемой точностью в данных условиях измерений. Из этого определения следует, что измерительные задачи характеризуются не только измеряемыми физическими величинами, но и условиями измерений.

Условия измерений могут быть различными и специфическими и тогда формулируется так называемая специальная измерительная задача. Поскольку измеряемая физическая величина количественно характеризует систему, явление или процесс, то одним из основных признаков классификации ФВ является исследуемый объект.

Физические величины подразделяют на: геометрические, механические, тепловые, электрические, магнитные, электромагнитных излучений, акустические, ядерно-физические.

Важными понятиями в теории измерений являются единица и размерность ФВ. Наличие единицы измерения ФВ, её размерности и шкалы позволяют установить все необходимые количественные отношения между физическими величинами при их измерении.

Единицей измерения ФВ называют физическую величину фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице, применяемую для количественного выражения однородных с ней физических ве-

личин. При этом различают основные и производные единицы физических величин, вводимые в той или иной системе единиц. Основными единицами называют единицы основных физических величин системы. Производными называют единицы производных ФВ системы. Основные ФВ для каждой системы величин принимаются в некоторой степени условно и являются независимыми от других величин этой системы.

Физическая величина, определяемая через основные величины, называется производной. Размерность такой ФВ представляет собой степенной одночлен, составленный из произведений символов основных ФВ.

Все ФВ являются элементами соотношений, формализующих наши представления о действительности. В тех случаях, когда ФВ непосредственно определяется каким-либо основополагающим уравнением, она аддитивна, т.е. её значения могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент, разделены друг на друга. Другими словами, эта ФВ имеет естественную масштабную шкалу, определяемую исключительно единицей измерения ФВ. К таким ФВ относятся масса, сила, длина, давление, скорость, время и др. Напротив, если ФВ не определяется непосредственно из основополагающего уравнения, она оказывается неаддитивной, т.е. перечисленные выше математические действия над ней лишены физического смысла. Такой неаддитивной ФВ является температура. Смысл температуры как ФВ устанавливают уравнения идеального газа, газо - кинетической теории, статистической физики, термодинамики и теплового излучения. Однако ни в одном из этих случаев нельзя прямо и непосредственно измерить температуру. Для неаддитивных ФВ шкала уже не может определяться только единицей ФВ. Необходимо также задание масштаба шкалы ФВ. Задание масштаба шкалы является исключительно вопросом соглашения. Именно этим объясняется существование различных температурных шкал: Фаренгейта, Реомюра, Цельсия, Кельвина.

Вернемся к единице ФВ. Существование международной системы единиц позволяет сопоставлять результаты любых измерений. Наличие такой системы кажется нам естественным. Однако так было не всегда. Первые шаги в созда-

нии общепринятой единицы ФВ были сделаны в 18-м веке во Франции. В 1790г. постановлением Национального собрания (эпоха Великой французской революции) была образована комиссия из ведущих ученых, которая предложила принять в качестве единицы длины 10^{-7} долю одной четвертой земного меридиана. Это предложение было утверждено 30 марта 1791 года, а в 1799 году были введены: единица длины – метр, единица веса – килограмм, вначале определенный как вес кубического дециметра воды при 4°C , а также единица времени – секунда (1/86400 средних солнечных суток).

Казалось бы, простая вещь – единица длины, но даже в этом, пожалуй, самом простом случае консенсус достигался не так просто. Даже через сто лет после введения метра существовали проблемы сличения единиц длины. Профессор Болотов В.В. описывает в своих лекциях (В.В. Болотовъ ЛЕКЦИИ ПО ИСТОРИИ ДРЕВНЕЙ ЦЕРКВИ. С.-Петербургъ, 1907г.) следующий случай: «В 1895г. два профессора, английский Ченей и русский Менделеев производили сличение двух мер: русской полусажени и английского ярда. Для ума простого работа эта покажется несложной и неважной; однако знаменитые учёные работали целых три дня, и неудивительно: они произвели 22 серии сличений, или 880 микрометрических измерений и 132 отсчёта термометров...В заключение труда составлен был протокол, последние слова которого гласили следующее: «так как вопрос о тождественности нормальной температуры 62°F и $16,667^{\circ}\text{C}$ по стоградусной шкале водородного термометра в настоящее время не может быть рассматриваем, как окончательно решённый, то в этом отношении предстоящий отчёт мы считаем не безусловно точным, а провизорным»».

Так же забавно выглядит процедура сопоставления дат в формальной хронологии (источник тот же): «Для того чтобы получить верные результаты, надо год по мусульманской эре помножить на 32, произведение разделить на 33, полученное частное сложить с 622 и $1/2$ и сумма почти всегда даст с достаточной точностью соответствующий год нашей эры».

Эти примеры лишней раз подчёркивают важность международной системы единиц ФВ.

Что касается единицы веса, то правильнее было бы говорить не о весе, а о массе, но в то время не делалось различий между массой и весом. Отметим, что метр и килограмм определены не как естественные величины, а сравнением с эталонами (прототипами): килограмм - масса, равная массе, международного прототипа килограмма. Это не очень удобно, так как усложняет обеспечение сохранности, возможности восстановления и повышение точности воспроизведения единицы. В заключительных лекциях мы поговорим о том, что предпринимает Международное Бюро Мер и Весов (МБМВ) по совершенствованию системы единиц ФВ.

Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) в 1954 г. определила шесть основных единиц физических величин для их использования в международных отношениях: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча. Но и в этом случае метр и килограмм не были определены как естественные величины.

На 11-ой ГКМВ в 1960 году было решено воспроизводить эталон метра по измерению естественной величины – долям волны монохроматического излучения (одна из спектральных линий криптона, ^{86}Kr): один метр содержит 1650763,73 длины волны в вакууме этой спектральной линии. Однако на 17-ой ГКМВ в 1983 году это определение было отменено, и метр был определён как длина пути, которую проходит свет в вакууме за $1/299792458$ долю секунды.

Уточнение единицы времени привело к новому определению секунды, как продолжительности 9192631770 периодов излучения при переходе между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома ^{133}Cs . Таким образом, по мере совершенствования процедур измерения может уточняться и основная единица системы.

Совершенствование системы единиц имеет, как мы видим, долгую историю. Её современные страницы открываются с создания Международной системы единиц СИ (SI – Systeme International d'Unites), рекомендованной 11-й ГКМВ в 1960 году для применения во всех странах. В систему СИ в качестве основных величин были включены – длина (м), время (с), масса (кг), сила элект-

трического тока (А), температура (К), сила света (Кд), а позже (в 1971г.) и количество вещества (моль).

К настоящему времени действуют следующие определения основных единиц:

метр - длина пути, которую проходит свет в вакууме за $1/299792458$ долю секунды (решение 17-ой ГКМВ 1983года);

килограмм - масса, равная массе, международного прототипа килограмма (решение 10-ой ГКМВ 1954 года) - цилиндр из сплава платина-иридий, хранится в Международном Бюро Мер и Весов в Севре (Франция);

секунда - продолжительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей (решение 13-ой ГКМВ 1967 года);

ампер - сила не изменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, создал бы между проводниками на длине в один метр силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (решение 9-ой ГКМВ 1948 года);

кельвин - $1/273,161$ часть термодинамической температуры тройной точки воды (решение 13-ой ГКМВ 1967 года); в МТШ-90 единица температурной шкалы определяется разностью температур фазового перехода из твёрдого в жидкое состояние и тройной точки воды ($273,16$ К точно), которая равна $0,01$ К точно.

моль - количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в изотопе C^{12} массой $0,012$ кг (принято в 1971 году);

кандела - сила света в данном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частоты $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (решение 16-ой ГКМВ 1979 года).

Внедрение системы СИ в нашей стране началось практически сразу после её принятия. В государственном стандарте СССР 1961 года (ГОСТ 9867) система СИ определена «как предпочтительная во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании».

До сих пор, наряду с системой СИ в некоторых отраслях науки применяются: система СГС и самая старая из всех - система МКГСС.

Как мы уже отмечали, помимо основных единиц системы существуют дополнительные и производные единицы. Дополнительными в системе СИ являются: единица плоского угла – радиан, единица телесного угла стерадиан (табл. 1.1). Производные единицы системы образуются из основных и дополнительных единиц при помощи определяющих уравнений.

Система СИ хорошо продумана но, тем не менее, не совершенна. Это, в частности, проявляется в том, что наличие идентичной размерности у нескольких производных единиц порождает некую неоднозначность системы. Этим не исчерпываются недостатки системы СИ. Требуется *усовершенствований определение единиц величин в направлениях*: повышения точности определения; обеспечения долговременной стабильности эталонов; защищенности от несанкционированных воздействий; определение единиц на основе естественных фундаментальных констант. Развитие этих направлений является главной задачей МБМВ и регулярно отражается в докладах Бюро на ГКМВ. В частности, эталон массы – артефакт. В будущем планируется его переопределение на основе либо постоянной Планка, либо числа Авогадро. Переопределение единицы массы повлияет на переопределение единицы электрического тока – Ампера, единицы количества вещества – моля, а Кельвин может быть переопределен на основе постоянной Больцмана.

Таблица 1.1

Единицы системы СИ

Физическая величина	Единица ФВ				Размерность по формуле определения
	Наименование	Обозначение			
		Русское	Международное		
<i>Основные ФВ</i>					
длина	метр	м	m	м	
время	секунда	с	s	с	

Физическая величина	Единица ФВ				Размерность по формуле определения
	Наименование	Обозначение			
		Русское	Международное		
масса	килограмм	кг	kg	кг	
сила электрического тока	Ампер	А	A	А	
термодинамическая температура	Кельвин	К	K	К	
сила света	Кандела	Кд	J	Кд	
количество вещества	моль	моль	mol	моль	
Дополнительные ФВ					
плоский угол	радиан	рад	rad	рад	
телесный угол	стерадиан	ср	sr	ср	
Примеры производных ФВ					
объем	кубический метр	м ³	m ³	м ³	
сила	Ньютон	Н	N	кг м/с ²	
давление	Паскаль	Па	Pa	Н/м ² =кг/м с ²	
динамическая вязкость		Па с	Pa s	кг/м с	
кинетическая вязкость		м ² /с	m ² /s	м ² /с	
работа	Джоуль	Дж	J	Н м = кг м ² /с ²	
мощность	Ватт	Вт	W	Дж/с = кг м ² /с ³	
освещённость	люкс	лк	lx	кд/м ²	
активность	Беккерель	Бк	Bq	с ⁻¹	
звуковое давление	Паскаль	Па	Pa	кг/м с ²	
индуктивность	Генри	Гн	H	кг м ² /с ² А ²	
электрический заряд	Кулон	Кл	C	А с	
электрическое напряжение	Вольт	В	V	кг м ² /с ² А	
электрическая ёмкость	фарада	Ф	F	А ² с ⁴ /кг м ²	

1.3. Передача, хранение, воспроизведение единицы ФВ, прослеживаемость измерений

Единство измерений - состояние измерений, характеризующееся тем, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам единиц, воспроизводимых первичными эталонами, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы (РМГ 29-99).

Прослеживаемость результата измерений - свойство результата измерения, заключающееся в возможности установления его связи с государственным первичным эталоном единицы величины.

Размеры единицы величин передаются средствам измерений, техническим системам и устройствам с измерительными функциями с помощью эталонов единиц величин.

Государственные эталоны единиц величин образуют эталонную базу РФ.

Эталоны подразделяются на *первичные*, обеспечивающие воспроизведение единицы с наивысшей в стране точностью, и *вторичные*, воспроизводящие размер единицы путем сличения с первичным эталоном.

Эталоны, обеспечивающие воспроизведение единицы в особых условиях и являющиеся для этих условий первичными, называются *специальными эталонами*.

Вторичные эталоны подразделяются на:

- *эталон-копии*, предназначенные для передачи размера единиц рабочим эталонам;
- *эталон сравнения*, применяемые для сличения эталонов при невозможности непосредственного их сличения друг с другом;
- *эталон-свидетели*, предназначенные для проверки сохранности и неизменности государственного эталона, т.е. эталона, узаконенного на государственном уровне;
- *рабочие эталоны*, применяемые для передачи размера единицы образцовым средствам измерений наивысшей точности.

Перечень государственных эталонов содержит основные, дополнительные и производные единицы международной системы единиц (всего более 90 эталонов).

Государственные первичные эталоны единиц величин не подлежат приватизации.

Государственные первичные эталоны единиц величин хранятся и применяются в Государственных научных метрологических институтах. Сведения о государственных эталонах единиц величин вносятся в Федеральный информационный фонд в области обеспечения единства измерений.

Государственные первичные эталоны единиц величин подлежат утверждению ФОИВ, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений.

Государственные первичные эталоны единиц величин подлежат международным сличениям.

Стандартные образцы предназначены для воспроизведения, хранения и передачи *характеристик состава или свойств веществ (материалов)*, выраженных в количественных значениях единиц величин, допущенных к применению в РФ.

Передача размера единицы ФВ от эталона рабочему средству измерения регламентируется поверочной схемой. В **поверочной схеме** устанавливается метод, средства, точность и соподчиненность средств измерений при передаче размера единицы физической величины от исходного образцового средства (эталона) до поверяемого рабочего СИ.

Государственная поверочная схема распространяется на все СИ данной физической величины. Государственную поверочную схему разрабатывают в виде государственного стандарта. Как правило, государственную поверочную схему возглавляет государственный эталон единицы физической величины.

Поверочные схемы строятся на принципе соподчиненности и должны включать не менее двух ступеней передачи размера единицы ФВ. Методы поверки СИ или передачи размера единицы ФВ, указываемые в поверочной схеме, должны соответствовать одному из следующих методов: непосредственного сличения; сличения с помощью компаратора; метода прямых измерений; метода косвенных измерений.

1.4. Понятие об измерении

Измерение – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемых величин с её единицей и получение значения этой величины.

Это стандартизованное определение понятия измерение удовлетворяет общему уравнению измерений, которое выражает сущность измерения как процесса сравнения и его цель.

Основное уравнение измерения записывается в виде отношения ФВ и её единицы

$$Q = q[Q],$$

где Q – измеряемая ФВ; q – числовое значение ФВ; $[Q]$ – единица ФВ.

В приведенном определении измерения отражены: познавательный процесс – получение значения величины, осознанная деятельность технического характера – совокупность операций и, наконец, метрологический аспект – сравнение с единицей.

С философской точки зрения измерение является процессом отображения фрагмента действительности в пространстве абстрактных образцов этой действительности. Теория измерений устанавливает правила осуществления этого отображения (правила преобразования).

Из приведенных рассуждений видно, что измерение – сложное понятие, неразрывно взаимосвязанное с целым рядом других важных понятий. Эту взаимосвязь можно проиллюстрировать структурной схемой измерения (рис. 1).

Эта структурная схема подчеркивает, в частности, то важное обстоятельство, что измерение не является самоцелью. Цель измерения всегда очень конкретна и тем самым она конкретизирует объект измерения, выделяя в нём измеряемую ФВ и определяя требования к объективности и истинности образа реальной действительности, что с точки зрения метрологии эквивалентно точности измерения. О точности измерения мы поговорим подробно позже, а пока определим некоторые понятия, приведенные на схеме.

Объект измерений – физическая система, явление или процесс, характеризующийся одной или несколькими измеряемыми физическими величинами.

Модель объекта измерений – теоретико-физическая и математическая конструкция, отражающая свойства объекта, существенные для данной измерительной задачи. Построение модели диктуется целью измерений и осуществля-

ется до выполнения измерения на основе априорной информации об объекте и об условиях измерения.

Условия измерений – совокупность значений или областей значений влияющих величин. Различают нормальные (когда влияющие величины не изменяют результата) и рабочие условия измерений (когда влияющие величины находятся в пределах рабочих областей).

Априорная информация – исходная информация об объекте и условиях измерения. Она должна содержать сведения о физических явлениях в объекте, возможных диапазонах изменения ФВ, условиях измерения и др. Если априорная информация отсутствует, то измерение невозможно. Если же в ней содержатся значения ФВ – измерение излишне.

Измерительный сигнал – сигнал, содержащий количественную информацию об измеряемой ФВ.

Результат измерения – значение ФВ, полученное путем ее измерения.

Метод измерений – совокупность приемов сравнения измеряемой ФВ с ее единицей в соответствии с физическим явлением или эффектом, положенным в основу измерения (принцип измерения). В зависимости от способа применения меры различают несколько методов измерений: непосредственной оценки, сравнения, нулевой, замещения, дополнения, дифференциальный.

Под методом измерений (или способом измерений) часто подразумевают менее общее, но более конкретное определение совокупности приемов сравнения и средств измерений. В этом случае можно говорить о том, что метод измерений обусловлен их целью. И, кроме того, составной частью метода оказывается алгоритм обработки данных.

В зависимости от способа обработки наблюдения с целью нахождения результата, измерения классифицируют по видам:

- **прямое измерение** – измерение, при котором искомое значение ФВ получают непосредственно из показания средства измерения;

- **косвенное измерение** – измерение, при котором определение искомого значения ФВ основано на результатах прямых измерений других ФВ, функционально связанных с искомым;
- **совокупные измерения** – измерения нескольких ФВ, производимые одновременно, при которых искомое значение ФВ определяют путем решения системы уравнений, полученных при измерениях различных сочетаний этих величин;
- **совместные измерения** – одновременные измерения нескольких не одноимённых ФВ для установления зависимости между ними.

Измерения классифицируются также и по другим признакам.

Рассмотрим подробнее основные стадии и этапы измерения ФВ, характерные для любой измерительной задачи (табл. 1.2). Одновременно отметим основные причины ошибок, часто не позволяющих достигнуть цели измерения.

Таблица 1.2

Основные стадии и этапы решения измерительной задачи

№	Стадия	Этап	Основные причины ошибок и обусловленных ими погрешностей
1	Предварительная	Получение исходной (априорной) информации об общих свойствах объекта исследований и условиях измерений	Неправомерность переноса опыта на вновь исследуемый объект
2	Постановка измерительной задачи	Моделирование объекта исследований	Ошибочные упрощения модели, неадекватное описание закономерностей
		Выбор измеряемой ФВ, характеризующей изучаемое свойство объекта	Неоднозначная связь ФВ со свойством объекта (погрешность несоответствия)
3	Планирование измерений	Выбор метода измерения ФВ	Ошибочная оценка обоснованности применения метода в реализуемых условиях измерений, включая воздействующие факторы
4	Планирование эксперимента	Выбор или разработка средства измерений с заданными значениями характеристик	Неточные сведения о характеристиках (неточные методы их расчета)
		Исследование характеристик средства измерения на соответствие заданным значениям	Неправомерность применения или отсутствие обоснованного метода градуировки, неправомерность переноса характеристик на рабочие условия измерений
		Выбор точек контроля	Непредставительность местоположения и объема контроля, влияние средства измерений на объект измерений, его взаимодействие с объектом (погрешность методическая)
		Изготовление / приобретение средства измерения и оснащение им объекта исследований	Некачественные изготовление и / или контроль средства измерений
5	Выполнение измерений	Регистрация данных	Несогласование элементов измерительной системы, не устраненные помехи, ошибки оператора, сбои и отказы из-за низкой надежности средств измерений и др. элементов измерительного устройства или измерительной системы
		Контроль работоспособности и диагностика состояния средства измерения	Недостоверность и/или неоднозначность методов контроля и диагностики
		Регулирование параметров процессов в исследуемом объекте (активный эксперимент)	Ошибочные решения об изменении параметров, влияющие на однозначность поведения объекта исследуемого

№	Стадия	Этап	Основные причины ошибок и обусловленных ими погрешностей
6	Заключительная	Обработка данных	дования и на характеристики средства измерения Ошибочный алгоритм, ошибки оператора
		Оценивание погрешностей результатов измерений	Неадекватность модели погрешности
		Анализ результатов	Необъективные методы анализа
		Корректировка модели объекта исследования и планирование более рационального исследования	Неправомерность и/или необоснованность выводов

Несколько слов о качестве измерений: В РМГ 29-99 термин качество измерений отсутствует. Это может означать, что применительно к качеству измерений нет особенностей по сравнению с определением качества для любой другой продукции или услуги. Следовательно, используя определение качества, приведённое в ГОСТ Р ИСО 9000-2001, можно сказать, что **качество измерений** - это степень соответствия присущих измерениям характеристик требованиям измерительной задачи.

Наиболее важными с точки зрения успешного решения измерительной задачи являются такие характеристики измерений, как их объективность, достоверность, точность, метрологическая надёжность применяемых СИ, техническая и информационная совместимость с техническими средствами объекта измерений и помехозащищённость в условиях измерений. Эти характеристики включают в себя и свойства СИ, и условия измерений, и обработку результатов. Именно поэтому нецелесообразно сужать понятие качества измерений до их погрешностей, как это традиционно делается в книгах по метрологии.

В какой степени количественный результат измерения соответствует истинному значению измеряемой физической величины. Вопрос этот очень важный, но и очень сложный. Главная причина сложности вопроса заключается в понятии «истинное значение величины». В отечественной теоретической метрологии **истинное значение физической величины** определяется как значение ФВ, которое идеальным образом характеризовало бы в качественном и количественном отношении соответствующую ФВ. Международный словарь по метрологии определяет истинное значение как значение, соответствующее определению данной конкретной величины. Два этих определения, хотя и несколько различаются, одинаково указывают на то, что истинное значение может быть

установлено лишь в практически нереализуемом идеальном измерении, т.е. в измерении без какой бы то ни было неопределенности или погрешности.

В связи с этим возникает проблема определения значения ФВ, эквивалентного с точки зрения измерения, истинному.

Такое значение ФВ называют действительным. В российских стандартах действительное значение ФВ определяется как значение ФВ, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Несколько иначе, но по существу очень похоже, определяет действительное значение международный словарь по метрологии: это значение, приписываемое ФВ и принимаемое, часто по соглашению, как имеющее неопределенность, приемлемую для данной цели. Определение, даваемое международным словарем, представляется более реалистичным, поскольку предшествующее ему определение содержит, к сожалению, неопределимое понятие «настолько близкое к истинному значению», что несколько не лучше, чем попытка определить истинное значение ФВ.

Во вновь введенных (с 2002 года) в российскую законодательную метрологию стандартах ИСО/МЭК 5725 рекомендовано к применению так называемое «принятое опорное значение», которое служит в качестве согласованного для сравнения и заменяет привычное нам «среднее значение», которое, в свою очередь, в условиях отсутствия необходимых эталонов заменяло собой действительное значение ФВ.

Таким образом, проблема замены неопределимого по природе понятия на определимое, но в какой-то степени ему эквивалентное, является проблемой соглашения. Если это соглашение достигнуто, то можно перейти к следующему, не менее важному в метрологии вопросу – с какой точностью в процессе измерения устанавливается соотношение измеряемой ФВ с ее единицей?

Точность в общем смысле – понятие качественное. Точность характеризует близость результата к истинному значению величины (или, точнее, к ее эквивалентам). В этом аспекте точность является категорией познания. С другой

стороны, когда истинное значение ФВ заменено определяемым действительным значением ФВ, точность становится характеристикой качества измерения. В этом случае уже речь идет не только о погрешности измерений, но и о погрешности средств измерений. Присутствие философского содержания в понятии точность и является основной причиной одновременного существования таких понятий теоретической метрологии, как неопределенность и погрешность измерения.

1.5. Понятие о неопределенности и погрешности измерения

Международные метрологические организации в 80-х годах разработали и в 93-м году прошлого века приняли «Руководство по выражению неопределенности измерения», определяющее основные понятия и процедуры оценивания неопределенности измерения.

Неопределенность измерения – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые достаточно обоснованно могли бы быть приписаны измеряемой величине.

Таким параметром может быть, например, стандартное отклонение, число кратное ему, или ширина интервала при заданном уровне доверия. Таким образом, неопределенность измерения может быть выражена в виде дисперсии точечной оценки ФВ или в виде доверительных границ интервальной оценки ФВ.

Неопределенность результата измерения, выраженная как стандартное отклонение, называется стандартной неопределенностью.

Неопределенность, выражение в виде интервала, внутри которого с заданной вероятностью находится значение измеряемой ФВ, называется расширенной неопределенностью.

Коэффициент, равный отношению расширенной неопределенности к стандартной, называется коэффициентом охвата.

Различают две категории составляющих неопределенности, отличающиеся способом их численной оценки:

Категория А – составляющие, оцениваемые путем применения статистических методов.

Категория В – составляющие, оцениваемые иным способом.

Более привычным и распространенным в практике технических измерений является понятие «погрешность измерения».

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. В этой формулировке под истинным значением ФВ понимается ее действительное значение. Измеренное значение ФВ равно алгебраической сумме истинного (действительного) значения ФВ и погрешности измерения.

Кратко суммируя приведенные выше рассуждения, отметим основное отличие двух обозначенных подходов к точности измерений.

В рассуждениях о неопределенности отвергается сама возможность определения истинного значения ФВ. Считается, что при измерениях возникает совокупность результатов, которые с достаточным обоснованием могут быть приписаны измеряемой величине. Рассеяние этих результатов и характеризуется неопределенностью.

Идея подхода с применением понятия погрешность заключается в том, что в результате измерений может быть определено действительное значение ФВ, но с погрешностью, которая характеризует отклонение результата измерения от действительного значения величины.

Различия обсуждаемых понятий философского характера представляются существенными, однако, как мы убедимся позже, процедуры определения значений параметров неопределенности и погрешности очень близки.

Здесь уместно отметить, что ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 вводит в отечественную метрологическую практику новые понятия, а именно:

Правильность - степень близости среднего значения, вычисленного по большой серии результатов измерений, к принятому опорному значению (истинному, действительному, аттестованному, теоретическому). Правильность по существу является характеристикой систематической погрешности.

Прецизионность – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Прецизионность характеризует разброс случайных результатов и обычно выражается через СКО. Крайними случаями прецизионности являются повторяемость (сходимость) и воспроизводимость.

Повторяемость (сходимость) – это прецизионность в условиях повторяемости. Условия повторяемости подразумевают получение результата при одних и тех же: методе, объекте, лаборатории, операторе и оборудовании, в пределах короткого промежутка времени.

Воспроизводимость – это прецизионность в условиях воспроизводимости. Условия воспроизводимости подразумевают получение результата при одних и тех же: методе и объекте (в разных лабораториях, разными операторами, на разном оборудовании и без ограничений по времени).

Таким образом, повторяемость характеризует минимальную, а воспроизводимость – максимальную изменчивость результата.

С точки зрения количественной характеристики точности можно говорить о том, что правильность и прецизионность являются составляющими точности.

В последующем изложении мы будем в основном придерживаться более привычных для отечественной практики терминов с учетом их эквивалентности вновь вводимым.

К тому же, в отечественной метрологии все более утверждается мнение, что выражение результата в терминах погрешности и неопределенности не взаимно исключают, а дополняют друг друга.

При сопоставлении погрешности и неопределенности следует руководствоваться схемой аналогий (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Таблица аналогий

Погрешность	Неопределенность
СКО случайной погрешности, S_i	Стандартная неопределенность по типу А, u_{Ai}
СКО, характеризующее неисключенную систематическую погрешность, Θ_i	Стандартная неопределенность по типу В, u_{Bi}

Погрешность	Неопределенность
СКО, характеризующее суммарную погрешность, S_{Σ} .	Суммарная стандартная неопределенность, u_c .
Доверительная граница погрешности, Δ_p	Расширенная неопределенность, $U_p = k \cdot u_c$, k – коэффициент охвата.
Оценивание погрешности i -того результата	Оценивание неопределенности i -того результата
$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	$u_{A,i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
$S_{\Theta_i} = \sqrt{\frac{\Theta_i^2}{3}}$	$u_{B,i} = \frac{b_i}{\sqrt{3}}$ (b_i – симметричные границы отклонения результата измерений от измеряемой величины)
$S_{\Sigma i} = \sqrt{S_i^2 + \frac{\Theta_i^2}{3}}$	$u_{c,i} = \sqrt{u_{A,i}^2 + u_{B,i}^2} = \sqrt{u_{A,i}^2 + \frac{b_i^2}{3}}$
$\Delta_p = t_p(f_{эфф}) \cdot S_{\Sigma}$ ($f_{эфф}$ – эффективное число степеней свободы)	$U_p = t_p(v_{эфф})u_c$ ($v_{эфф}$ – эффективное число степеней свободы); $U_{0,95} = 2u_c; U_{0,99} = 3u_c$ – для нормального закона распределения. $U_{0,95} = 1,65u_c; U_{0,99} = 1,71u_c$ – для равномерного закона распределения.

Рассматривая попарно соотношения для вычисления погрешности и неопределенности, нетрудно заметить разницу между двумя подходами.

Следует подчеркнуть, что здесь и далее мы рассматриваем погрешности прямых измерений, при косвенных измерениях необходимо учитывать коэффициенты влияния, получаемые по правилам дифференцирования уравнения измерений. Подробнее это будет рассмотрено в следующем разделе.

На практике, для сравнения точности результатов измерений или методик выполнения измерений вообще, получаемой в различных подходах, рекомендуются две схемы перехода от полученных (традиционных) показателей точности – погрешностей к неопределенностям.

Первая схема. При известных:

- результате измерений y ;
- СКО случайной погрешности результата измерений S ;
- доверительной границе неисключенной систематической погрешности результата измерений Θ_p ;
- числе составляющих неисключенной систематической погрешности $m_{сист}$;
- числе измерений n

вычисляют (для того же результата y):

$$u_A = S;$$

$$u_B = \frac{\Theta_p}{k\sqrt{3}}, \text{ где } k = 1,1 \text{ при } P = 0,95 \text{ и } k = 1,4 \text{ при } P = 0,99, m_{\text{суст}} > 4;$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2};$$

$$V_{\text{eff}} = (n-1) \left[1 + \frac{u_B^2}{u_A^2} \right]^2;$$

$$U_p = t_p(V_{\text{eff}}) \cdot u_c.$$

Вторая схема. При известных:

- результате измерений y ;
- доверительной границе погрешности измерений Δ_p ;
- доверительной вероятности P

вычисляют (для того же результата y):

$$U_p = \Delta_p;$$

$$u_c = \frac{\Delta_p}{Z_p},$$

где Z_p – квантиль нормального распределения.

В этой схеме показано, что имея только значение Δ_p невозможно найти оценки u_A и u_B .

Практика показывает, что различия в интервальных оценках погрешности и неопределенности измерений (Δ_p и U_p), как правило, не очень велики и обычно имеют место при обработке результатов косвенных измерений.

2. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Понятие о средстве измерений

Как уже отмечалось выше, измерение производится с помощью технического средства. Это техническое средство и есть средство измерений. Согласно РМГ 29-99:

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и/или хранящее единицу ФВ, размер которой принимается (в пределах погрешности) неизменным в течение известного интервала времени.

Если измерение не связано с передачей размера единицы другим средствам измерений, то средство измерений называется рабочим. В ином случае средство измерений называется мерой. Меры различают однозначные и многозначные. Меры входят в состав эталонов единиц ФВ.

Средство измерения характеризуется: видом измеряемой ФВ, принципом измерения, методом измерения, статическими и динамическими характеристиками, условиями применения, показателями точности.

В средстве измерения, как правило, реализуется последовательность преобразований физической величины.

Определим несколько важных для дальнейшего рассмотрения понятий:

Тип средства измерений – совокупность средств измерений одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации.

Вид средства измерений – совокупность средств измерений, предназначенных для измерения данной физической величины. Вид СИ может включать в себя несколько их типов.

Пример: Вид средств измерений температуры – термометр; типы средств измерений температуры – термопара, термометр сопротивления.

Измерительный преобразователь – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи и имеющее нормированные (установленные в НД) метрологические характеристики.

Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо прибора, установки, системы, или же применяется вместе с каким-либо средством

измерений. По месту (расположению) в измерительной цепи различают первичные и промежуточные преобразователи.

Первичный преобразователь – измерительный прибор, на который непосредственно воздействует ФВ. Конструктивно обособленный первичный преобразователь называется датчиком (или детектором, или сенсором). Преобразователь, в котором под воздействием ФВ генерируется собственный электрический сигнал, называют генераторным, а преобразователь, в котором имеется внешний источник питания – параметрическим.

Предметом нашего интереса являются, в основном, электрические измерения физических величин, т.е. средства измерений, в которых ФВ преобразуется в выходной электрический сигнал. Это единственный способ осуществить дистанционные измерения по защищенному каналу. И именно такие преобразователи мы будем в дальнейшем рассматривать.

В теории измерительных устройств всё многообразие датчиков может быть описано ограниченным числом измерительных преобразователей, объединенных в структурные схемы: прямого преобразования, уравнивающего преобразования с обратной связью и с разветвленной цепью (рис.2.1).

В измерительных преобразователях преобразуются сигналы различной физической природы. На основе анализа структурных схем устанавливаются наиболее общие свойства цепи преобразований: - суммарная чувствительность равна произведению чувствительностей последовательно включаемых преобразователей или сумме чувствительностей параллельно включаемых преобразователей. Из анализа структурных схем могут быть получены: уравнение измерения и функция преобразования. В параметрических датчиках выходной сигнал содержит информацию о параметрах внешнего источника питания. Фактически в таком датчике имеет место преобразование параметров питания. Воздействие измеряемой ФВ в данном случае вызывает изменение коэффициента этого преобразования. С точки зрения измерения ФВ важно, чтобы изменение упомянутого коэффициента было однозначно связано с изменением ФВ.

Зависимость вида $Y=F(X)$ называют *функцией преобразования* датчика. Функция преобразования описывает свойства датчика по выходному сигналу в заданном диапазоне изменения измеряемой ФВ. Исследование функций преобразования необходимо при разработке и проектировании датчика.

При его применении (эксплуатации) осуществляется процедура восстановления значения ФВ по выходному сигналу, т.е. определение X как функции Y . С этой целью должна быть известна зависимость $X=F^{-1}(Y)$, которая называется *градуировочной характеристикой*. Функция F^{-1} – обратная функция F . Наличие градуировочной характеристики позволяет установить шкалу прибора в единицах ФВ.

В простейшем случае, при линейной функции преобразования $Y=aX$, градуировочная характеристика также линейна $X=a'Y$. При более сложных функциях преобразования могут возникнуть трудности не только с получением обратной функции преобразования (и градуировочной характеристики), но и с восстановлением модели погрешности средства измерения (погрешность по входу, т.е. по X) по исследованной при разработке датчика погрешности преобразования (погрешность по выходу, т.е. по Y). На практике, для рабочих средств измерений (средств, не предназначенных для передачи единицы ФВ другим средствам измерений) эта проблема решается при их первичной поверке или аттестации. В процедуре поверки используется эталон ФВ. Показания средства измерений в единицах ФВ сравниваются с эталоном, их различия и определяют погрешность средства измерений.

Средство измерений должно иметь *нормированные метрологические характеристики*, к наиболее важным из которых относят: статическую функцию преобразования (прямую и/или обратную), динамические характеристики, диапазон измерений, погрешности.

Рассмотрим основные *статические и динамические* характеристики средства измерений.

Статические характеристики описывают поведение средства измерений в установившихся (статических) режимах работы.

Основными статическими метрологическими характеристиками средства измерений являются:

- функция преобразования;
- чувствительность (дифференциальная $s=dY/dX$ и суммарная $S=\Delta Y/\Delta X$);
- диапазон измерений по входу ΔX ;
- диапазон показаний по выходу ΔY ;
- порог чувствительности (срабатывания);
- вариация (разность показаний при прямом и обратном ходе);
- погрешность;
- импедансы (входной, выходной);
- функция влияния (воздействие влияющих величин).

Динамические характеристики описывают установившиеся режимы работы средств измерений при переменных входных сигналах.

По степени полноты описания математической модели динамических свойств различают полные и частные динамические характеристики. Полные динамические характеристики могут быть выражены одна через другую. В литературе часто описываются динамические характеристики средства измерений без разделения их по режимам работы датчика: установившегося и переходного. Это не совсем корректно и несколько запутывает ситуацию, поэтому мы будем придерживаться подхода, в котором отдельно рассматриваются динамические характеристики средства измерений в установившемся и в переходном режимах его работы. Подчеркнем, что эти два режима естественным образом разделяются, так как в первом из них идет речь об измерении переменного гармонического сигнала, а во втором – меняющегося аperiodического (скачок, рост, снижение). В соответствии с этим динамические характеристики датчиков разделяют на частотные и временные.

К полным динамическим характеристикам средств измерений относят: *переходную, импульсную переходную, амплитудно-фазовую, амплитудно-частотную, совокупность амплитудно-частотной и фазо - частотной характеристик, передаточную функцию.*

К частным динамическим характеристикам относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик: *время реакции, коэффициент демпфирования, постоянная времени, значение АЧХ на резонансной частоте, собственная частота, а также максимальная частота измерений* и погрешность датирования отсчета - для цифровых приборов.

Частотные характеристики датчика

Пусть измеряемая ФВ меняется во времени по гармоническому закону $x(t)=x_0+x_1\cos \omega t$.

Выходной сигнал датчика при этом приобретает форму:

$$y(t)=y_0+y_1\cos (\omega t+\psi),$$

где y_0 определяет рабочую точку на статической характеристике датчика, а ψ - сдвиг фазы между вариациями на входе и выходе.

Когда $x(t)$ – негармонически меняющаяся величина, ее можно представить в форме разложения в ряд Фурье. Аналогично будет выглядеть и разложение выходного сигнала, в гармонических слагаемых которого также будет иметь место сдвиг фаз.

В общей форме взаимосвязь величин $x(t)$ и $y(t)$ представляет собой дифференциальное уравнение первого, второго и, что бывает крайне редко, третьего порядка:

$$a \frac{dy}{dt} + by = x(t),$$

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = x(t)$$

$$a \frac{d^3 y}{dt^3} + b \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + dy = x(t)$$

Частотные характеристики системы первого порядка

При гармоническом изменении $x(t)$ амплитуда и сдвиг фазы выходного сигнала определяются соотношениями:

$$y_1 = \frac{x_1}{b} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_c)^2}}, \quad \psi = -\arctg(\omega / \omega_c),$$

где $\omega_c = b/a$ - граничная круговая частота.

Коэффициент b имеет физический смысл чувствительности статического сигнала, а отношение $a/b = \tau$ - постоянной времени.

Граничная частота ограничивает (условно) область частот переменной величины, при которых искажение амплитуды выходного сигнала (относительно статического значения) несущественно.

На рис. 2.2 показаны АЧХ и ФЧХ переходного звена первого порядка.

Частотные характеристики системы второго порядка

Коэффициенты дифференциального уравнения второго порядка имеют следующий физический смысл:

$\omega_0 = (ca)^{1/2}$ - собственная круговая частота незатухающей (колебательной) системы;

$\zeta = b/2(ca)^{1/2}$ - коэффициент затухания (демпфирования) системы.

Амплитуда выходного сигнала и сдвиг фаз равны:

$$y_1 = \frac{x_1}{c \sqrt{[1 - (\omega / \omega_0)^2]^2 + 4\zeta^2 (\omega / \omega_0)^2}},$$

$$\psi = -\arctg \left\{ \frac{2\zeta}{(\omega / \omega_0) [1 - (\omega / \omega_0)^2]} \right\}$$

На рис. 2.3 показаны АЧХ и ФЧХ системы второго порядка.

Подчеркнем, что рассмотренные выше частотные характеристики относятся к установившемуся режиму работы датчика при измерении гармонически меняющейся величины. При нерегулярном изменении измеряемой величины датчик некоторое время работает в переходном режиме. Способность датчика измерять меняющуюся ФВ без искажения характеризуется его инерционностью (или быстродействием). Воздействием на датчик так называемых тестирующих сигналов (единичный скачок или кратковременный импульс) определяются его временные характеристики (как правило, это упомянутые ранее частные динамические характеристики средства измерений). Как и в случае гармонического

выходного сигнала, время переходного процесса зависит от порядка переходного звена.

Для системы первого порядка время достижения уровня $(1-\varepsilon)$ выходного сигнала (в относительных единицах) равно

$$t_r(\varepsilon) = 2,3(2 - \lg \varepsilon)\tau;$$

где $\varepsilon = 1 - (t_r/t_{уст})$, τ - постоянная времени.

Для систем более высокого порядка аналогичные выражения гораздо более сложные. Переходные функции система второго порядка, например, сильно зависят от коэффициента затухания (рис.2.4).

Из рис.2.4 видно, что в отсутствии демпфирования ($\zeta=0$) система становится незатухающей. Обратим также внимание на то, что быстродействие системы второго порядка тем выше, чем больше собственная частота незатухающих колебаний ω_0 . Оптимальное значение коэффициента демпфирования с точки зрения уменьшения времени установления находится в пределах 0,6-0,8.

2.2. Виды и характеристики измерительных сигналов

Классификация измерительных сигналов

В дистанционных измерениях информация об измеряемой ФВ передается к регистратору измерительного устройства или измерительной системы с помощью различного вида сигналов, подвергаемых процедурам модуляции, дискретизации (квантования) и кодирования. Сигнал от датчика является материальным носителем информации о ФВ. Если в сигнале содержится количественная информация о значении измеряемой ФВ, то его называют **измерительным** (ГОСТ 16465-70 Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения).

Образцовым называют сигнал, характеристики которого априорно известны (образцовые меры). Измерительный сигнал в отличие от образцового содержит априорную неопределенность значений некоторых своих параметров.

Если между параметрами сигнала и измеряемой ФВ существует известная функциональная связь, то этот параметр называют **информативным**. При отсутствии такой связи параметр относится к **неинформативным**.

Измерительные сигналы классифицируются по различным признакам:

- аналоговые, дискретные, цифровые;
 - постоянные и переменные по времени;
 - детерминированные и случайные;
 - непрерывные по параметру и времени;
 - непрерывные по параметру, но дискретные по времени (импульсные);
 - дискретные по параметру (квантованные) и времени;
- и др.

Аналоговый сигнал – сигнал, описываемый непрерывной или кусочно-непрерывной функцией на заданном интервале значений и времени.

Дискретный сигнал – сигнал, изменяющийся дискретно во времени и по уровню.

Цифровой сигнал – квантованный по уровню и дискретный по времени, описываемый квантованными последовательностями, принимающими в дискретные моменты времени лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования.

Математическое моделирование измерительных сигналов

Математическая модель измерительного сигнала имеет вид: $Y=f(X,A,B,C\dots)$, где Y - основной информативный параметр сигнала; X - независимый аргумент сигнала; A,B,C - параметры сигнала. Аргументом сигнала может быть время или частота. В зависимости от типа аргумента сигнал описывается временной или частотной моделью. Один из параметров сигнала однозначно связан с измеряемой величиной. Временное представление более привычно и легко воспринимается оператором, и позволяет определить мощность и длительность сигнала. Частотное представление сигнала позволяет определить его спектр и частотный диапазон и определяет параметры

аппаратуры, например, полосу пропускания или частоту среза. Частотное представление основано на Фурье – преобразовании передаваемого сигнала:

$$Y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \varphi_n),$$

где A_0 – постоянная составляющая; A_n и φ_n – амплитуда и фаза n -ой гармоники.

Множество амплитуд и фаз образуют амплитудный и фазовый спектры (амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики). Эти спектры могут быть непрерывными или дискретными.

Графики простейших сигналов – постоянного и периодического во временном и частотном представлениях показаны на рис. 2.5 и 2.6.

Для описания непрерывного спектра непериодического сигнала применяют спектральную функцию $S(\omega)$, модуль спектральной функции $|S(\omega)|$ и аргумент спектральной функции $\arg S(\omega)$.

Спектральная функция выражается через интеграл Фурье:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t) \exp(-j\omega t) dt = |S(\omega)| \exp[-j \arg S(\omega)] = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t) \cos \omega t dt - j \int_{-\infty}^{+\infty} Y(t) \sin \omega t dt = \\ &= \operatorname{Re}[S(\omega)] - j \operatorname{Im}[S(\omega)] \end{aligned}$$

Модуль и аргумент спектральной функции равны:

$$\begin{aligned} |S(\omega)| &= \sqrt{\operatorname{Re}^2[S(\omega)] + \operatorname{Im}^2[S(\omega)]}; \\ \arg S(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[S(\omega)]}{\operatorname{Re}[S(\omega)]}. \end{aligned}$$

Модуль спектральной функции выражает спектральную плотность амплитуд комплексной спектральной функции (комплексного спектра). На рис. 2.7 показаны временной и частотный графики простейшего аperiodического сигнала.

Модуляция измерительного сигнала

Модуляция – это воздействие измерительного (модулирующего) сигнала на какой-либо параметр стационарного (несущего, модулируемого) сигнала, который передается по измерительной цепи и преобразуется.

Несущим электрическим сигналом может быть: постоянный, переменный гармонический и импульсный ток. Постоянный ток имеет один параметр (сила тока), переменный три параметра (амплитуда, частота, начальная фаза),

импульсный – семь параметров (амплитуда, период повторения, длительность импульса, скважность, частота следования импульсов, фаза, задержка).

После прохождения модулированного сигнала по каналу связи к устройству регистрации, необходимо осуществить его **демодуляцию (детектирование)**.

В измерительной технике наиболее широко применяют модуляцию (амплитудную, частотную или фазовую) гармонического несущего сигнала. Суть процедуры заключается в том, что носителем информации о ФВ является гармонически меняющийся электрический сигнал, а параметром модуляции – его амплитуда (частота или фаза). Если изменение во времени значений измеряемой ФВ происходит по функции $x(t)$ (в относительных единицах $|x(t)| \leq 1$), то при несущих колебаниях вида

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где A_0 , ω_0 и φ_0 - амплитуда, круговая частота и начальная фаза несущих колебаний, модулированная амплитуда несущих колебаний имеет временную зависимость вида

$$A_m = A_0 [1 + mx(t)],$$

где m – коэффициент амплитудной модуляции, а амплитуда несущих колебаний меняется по закону

$$a(t) = A_0 [1 + mx(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Описанная процедура амплитудной модуляции гармонического сигнала графически изображена на рис.2.8.

Восстановление исходной формы сигнала осуществляется путем демодуляции. При амплитудной модуляции гармонического сигнала демодулятор представляет собой усилитель + ФНЧ.

Как меняется спектр сигнала при амплитудной модуляции?

Пусть: $x(t) = X_m \cos \Omega t$.

Тогда: $a(t) = A_0 [1 + mx(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \{ \text{при } mX_m = A_0 \text{ и } \varphi_0 = 0 \} =$

$$A_0 (1 + \cos \Omega t) \cos(\omega_0 t) = A_0 [\cos(\omega_0 t) + 0,5 \cos(\omega_0 + \Omega)t + 0,5 \cos(\omega_0 - \Omega)t].$$

Таким образом. Модулированный сигнал расщепляется на три гармоники.

Если исходный сигнал негармонический, но периодический, то огибающая амплитудно-частотного спектра модулированного сигнала описывает форму изменяющейся ФВ.

При частотной модуляции амплитуда несущего сигнала является функцией мгновенной частоты модулированного сигнала. В результате частотной модуляции возникает расширение частот несущего сигнала ($\Delta\omega$) относительно его исходной несущей частоты ω_0 , которое называют *девиацией частоты* (рис.2.9). Детектирование частотно-модулированного сигнала осуществляется путем его преобразования в амплитудно-модулированный с последующим применением амплитудного детектора.

Канал связи используется значительно более эффективно с точки зрения объема передаваемой информации при модуляции импульсных сигналов. Кроме того, увеличение мощности в единичном импульсе, повышает помехоустойчивость канала. Наиболее часто применяют импульсы прямоугольной формы.

Характеристики сигнала при импульсной модуляции: амплитуда A_m , период повторения T , длительность импульса τ , скважность $Q=T/\tau$, частота следования импульсов $f=1/T$, фаза $\varphi=2\pi t_3/T$ и задержка t_3 относительно опорной последовательности импульсов. Любая из этих характеристик может служить параметром модуляции (рис.2.10).

Дискретизация

Дискретизация непрерывной величины может осуществляться по уровню и по времени. Процедура дискретизации (квантования) по уровню заключается в разбиении интервала на некоторое количество интервалов квантования. Измеряемый сигнал по величине попадает в какой-либо интервал квантования и его значение относится к разрешенному значению шкалы.

Дискретизация по времени есть процесс преобразования функции непрерывного времени в функцию дискретного времени. В простейшем случае это означает взятие отсчетов функции в определенные дискретные моменты времени. Параметром дискретизации по времени является шаг дискретизации. После

передачи по каналу связи по дискретным значениям должна быть восстановлена исходная непрерывная функция с необходимой точностью. Важный вопрос дискретизации по времени – выбор шага дискретизации, от него зависит точность восстановления переменной непрерывной величины. Условия, описывающие возможность восстановления функции по дискретным отсчетам, устанавливает теорема Котельникова:

Если непрерывная функция $x(t)$ ограничена, кусочно - непрерывна и имеет конечное число экстремумов и ее спектр ограничен некоторой частотой ω_c (частота среза), то существует такой максимальный интервал Δt между отсчетами, при котором имеется возможность без искажения восстановить непрерывную функцию $x(t)$ по дискретным отсчетам. Этот максимальный интервал равен $\Delta t = \pi/\omega_c = 0,5f_c$.

Эта теорема основана на разложении непрерывной функции в ряд Котельникова.

Кодирование

Кодированием называется процесс преобразования сообщений в комбинации из дискретных сигналов, а совокупность правил, в соответствии с которыми производятся данные преобразования, является кодом. Кодовая комбинация содержит последовательность условных символов-элементов кодовой комбинации. Элементами кодов могут быть буквы, цифры, импульсы тока, напряжения, интервалы между импульсами и др. Параметрами закодированного сигнала могут служить размер, полярность, интервал, фаза, частота. При передаче информации в кодах увеличивается помехоустойчивость сообщения, достигается снижение стоимости передачи. Помехоустойчивость кодированной информации тем выше, чем больше избыточность кода (чем больше число проверочных разрядов кода).

Помехи

Помехой называют сигнал, однородный с измерительным, действующий одновременно с ним и не содержащий информации о измеряемой ФВ. Помеха может существенно изменить характеристики измерительного сигнала, что

снижает точность измерений, а иногда и полностью его исказить. Авторы монографии «Искусство схемотехники» - П. Хоровиц и У. Хилл считают борьбу с помехами «самой темной областью искусства схемотехники».

По источнику возникновения различают внутренние и внешние помехи. Источниками внешних помех являются природные процессы (электрические, магнитные поля, ионизирующие излучения) и работа электротехнических и радиоэлектронных устройств (индуктивные и емкостные связи). Источниками внутренних помех являются многообразные процессы в цепях и элементах измерительного устройства: термоЭДС, токи утечки, переходные процессы при коммутациях цепей, электростатические и пьезоэлектрические заряды, возникающие в результате механических воздействий (вибрация, удар), шумы в элементах схем (тепловой, дробовой, фликкер).

По воздействию на вход прибора различают помехи:

- между входом прибора и «землей» (помеха общего вида, синфазная, продольная);
- между входами прибора (помеха нормального вида, поперечная, противофазная, дифференциальная).

Поперечная помеха имитирует входной сигнал, поэтому она наиболее вредна и нежелательна.

По зависимости от выходного сигнала различают помехи:

- налагающиеся (аддитивная, помеха входа);
- деформирующие (мультипликативная, помеха функции преобразования).

При аддитивной помехе выходной сигнал равен сумме полезного сигнала и сигнала помехи. При мультипликативной помехе выходной сигнал искажается в зависимости от уровня помехи в сравнении с величиной полезного сигнала.

Для снижения помех применяют подавление, компенсацию и обратную связь. Наиболее распространенный прием подавления помех – экранирование. Однако не грамотное применение экранов может не только не улучшить, но и существенно ухудшить ситуацию.

2.3. Измерительные цепи. Схемы формирования и преобразования сигнала

Измерительный сигнал от первичного преобразователя должен быть преобразован (усилен, отфильтрован и пр.), передан и зарегистрирован. Эти функции выполняются элементами измерительной цепи.

2.3.1. Цепь генераторного преобразователя

В простейшем случае (чисто активные сопротивления), эквивалентная схема измерительной цепи генераторного преобразователя (датчика) не отличается от потенциметрической (рис. 2.11а), когда датчик является источником ЭДС, и реостатной (рис. 2.11б), когда датчик является источником тока. Для того чтобы падение напряжения на нагрузке не отличалось существенно от величины генерируемой ЭДС, входное сопротивление датчика должно быть во много раз меньше сопротивления нагрузки.

Генерируемая преобразователем мощность определяется его параметрами – $E_{ист}$ или $I_{ист}$ и внутренним сопротивлением $R_{вн}$: $P_{г} = E_{ист}^2 / R_{вн}$ (схема 2.11, а) или $P_{г} = I_{ист}^2 R_{вн}$ (схема 2.11, б), а мощность передаваемая нагрузке равна $P_{н} = \alpha P_{г}$, где α - коэффициент преобразования, равный $\alpha = R_{вн} R_{н} / (R_{вн} + R_{н})^2$.

2.3.2. Основные типы цепей параметрических преобразователей

Простейшими цепями параметрического датчика являются потенциметрическая схема, при питании датчика источником напряжения, и реостатная – при питании источником тока. Схемы аналогичны рис.2.11, но в этом случае нагрузкой является сам датчик, т.е. $R_{н}$ нужно заменить на $R_{д}$, а выделенное пунктиром относится к источнику питания параметрического датчика.

В потенциметрических схемах с резистивными датчиками часто используют схемы с делителями, в которых применяются дополнительные резисторы, выполняющие роль эталонных элементов цепи (рис.2.12).

Лучшие метрологические характеристики датчика, чем в потенциометрической, реализуются в мостовой схеме, являющейся по существу двойным потенциометром. Наиболее известен мост Уитстона для резистивного датчика.

При выполнении условия: $R_1R_4=R_2R_3$ $U_H=0$ и мост (рис.2.13) называют уравновешенным. Падение напряжения на R_H связано с напряжением источника $E_{ист}$ соотношением:

$$U_H = E_{ист} \frac{R_1R_4 - R_2R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

При малом приращении, например, сопротивления $R_1(\Delta R_1)$, $\Delta U_H \approx E_{ист} \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$

Мостовые схемы представляют собой широкий класс измерительных цепей параметрических датчиков. Их разновидности включают уравновешенные и неуравновешенные мосты, мосты постоянного и переменного тока, мосты одинарные и двойные, мосты резистивные, индуктивные, емкостные, мосты с дифференциальным включением датчиков, мосты с компенсацией воздействия влияющих факторов и др.

В цепях параметрических датчиков применяются также генераторные измерительные схемы. Суть применения таких схем заключается в том, что изменением частоты питания от источника (генератора) достигается совпадение ее с резонансной частотой датчика, зависящей от его электрических параметров (на которые, в свою очередь, влияет ФВ). Эта резонансная частота фиксируется (при достижении резонанса резко меняется выходной импеданс датчика) и она однозначно связана с измеряемой датчиком ФВ.

Для датчика, эквивалентная схема которого содержит индуктивность L и ёмкость C , резонансная частота F_0 при последовательном соединении L и C и параллельном, но при большом значении добротности катушки ($\omega L/R$), равна

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

К генераторным схемам относятся также схемы релаксационного типа. Наиболее распространенной из них является схема мультивибратора с самовоз-

буждением, представляющая собой генератор прямоугольных импульсов (рис.2.14).

Период следования импульсов мультивибратора на рис.2.14 зависит от параметров схемы R и C: $T \approx 2RC \lg \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$.

Таким образом, частота мультивибратора модулируется по закону изменения выходного импеданса датчика.

Выходной сигнал датчика (в эквивалентной схеме – напряжение на нагрузке) преобразуется (усиливается, фильтруется) и детектируется (демодулируется) в устройствах преобразования электрического сигнала в электрический сигнал.

Основные схемы преобразования измерительного сигнала

Современное исполнение схем преобразования измерительного сигнала базируется на элементах микроэлектроники. Область микроэлектроники, рассматривающая построение схем, называется *схемотехникой*. В настоящее время принято делить электронные схемы на два класса: цифровые и аналоговые. В основе цифровых схем лежат простейшие транзисторные ключи (аналоги металлических контактов) и переключатели тока. В основе аналоговых схем лежат простейшие усилители. Основной разновидностью аналоговых измерительных схем является операционный усилитель.

Рассмотрим основные типы схем с операционными усилителями (рис. 2.15).

В операционных усилителях достигаются очень большие (до 10^6) коэффициенты усиления. Одновременно с полезным сигналом усиливаются и некоторые виды шумов и помех. Снизить их влияние можно фильтрацией измеряемого сигнала. Различают фильтры нижних и верхних частот, полосовые фильтры. Фильтрация сигнала снижает порог чувствительности системы. Чтобы избежать этого, в детектировании амплитудно - модулируемых сигналов приме-

няют синхронное или когерентное детектирование сигнала, при котором используют вспомогательный источник опорного сигнала, генерирующий синхронный и синфазный с модулируемым сигналом. При детектировании частотно-модулируемых сигналов применяют устройства дискриминаторов, содержащих колебательный контур. Демодулирование измерительного сигнала в дискриминаторе происходит путем сравнения резонансной частоты контура дискриминатора и средней частоты модулируемого сигнала и последующего преобразования разницы частот в электрическое напряжение (частотно-амплитудное преобразование).

2.3.3. Согласование датчика с элементами измерительной цепи

Согласование датчика с цепью в общем плане означает согласование по виду передаваемого сигнала; диапазону измеряемых параметров элементов; чувствительности преобразователей, согласующих и регистрирующих устройств; входных и выходных импедансов (сопротивлений). При измерении, например, электрического напряжения, внутреннее сопротивление вольтметра должно быть значительно меньше сопротивления нагрузки, а при измерении тока – наоборот. Выполнение этого условия минимизирует искажение электрических параметров контролируемой цепи. Считается, что в цепях напряжения входные и выходные сопротивления элементов должны быть не менее 1 кОм, а в цепях тока – не более 1 кОм.

Эффективной с энергетической точки зрения считается передача сигнала с максимальной мощностью, что достигается при согласовании сопротивлений датчика Z_d и нагрузки Z_n . Такое согласование называется согласованием по мощности. Условием согласования датчика и нагрузки является:

- для генераторного преобразователя – $\max(P_n/P_{к.з.})$, где P_n – мощность, выделяемая на нагрузку, $P_{к.з.}$ – мощность короткого замыкания, $\xi_\Gamma = (P_n/P_{к.з.}) = a/(1+a)^2$, где, $a=R_n/R_d$;

- для параметрического преобразователя – $\max(P_n/P_{доп. \epsilon^2})$, где $P_{доп.}$ – допустимая мощность рассеяния преобразователя, $\epsilon = \Delta R/R_0$, R_0 – начальное сопротивление

и ΔR – изменение сопротивления датчика под воздействием измеряемой величины, $a_p = R_n/R_0$, $\xi_p = P_n/P_{доп} \cdot \epsilon^2$.

Условия согласования цепи датчика показаны на рис. 2.16.

На практике в средствах измерений практически никогда не реализуется точный режим согласования по мощности. Обусловлено это следующими причинами:

В генераторном преобразователе, являющимся источником напряжения, внутреннее сопротивление должно быть значительно меньше сопротивления нагрузки, в ином случае падение напряжения на нагрузке (входное сопротивление прибора) зависит от внутреннего сопротивления преобразователя, которое может меняться по разным причинам и, кроме того, регистрируемое прибором электрическое напряжение U_n меньше генерируемой преобразователем э.д.с. E_d :

$$U_n = E_d R_n / (R_n + R_d).$$

К генераторным преобразователям - источникам э.д.с. относится, например, термоэлектрический преобразователь температуры (термопара).

В генераторном преобразователе, представляющем из себя источник тока, наоборот – должно соблюдаться неравенство $R_d \gg R_n$, т.е. он должен работать в режиме короткого замыкания, иначе измеряемый прибором ток, во-первых, меньше генерируемого датчиком и, во-вторых, зависит от изменения его внутреннего сопротивления: $I_n = I_0 R_d / (R_d + R_n)$.

К генераторным преобразователям – источникам тока относятся, например, детектор прямого заряда и фотодиод.

Таким образом, в первом из рассмотренных случаев целесообразно смещение вправо, а во втором – влево от точки оптимального отношения R_d/R_n .

В параметрических датчиках также есть веские причины отступления от оптимума по согласованию нагрузки. В цепях последовательного включения и делителях существует нелинейность функции $U_n/E = f(\Delta R/R_0)$. Эта нелинейность тем больше, чем больше $a = R_n/R_d$. При включении в цепь делителя диф-

ференциального преобразователя наоборот – нелинейность уменьшается с увеличением a и достигает нуля при $a \rightarrow \infty$.

2.4. Измерительная установка и измерительные информационные системы

В Федеральном законе Об обеспечении единства измерений № 102-ФЗ от 26.06.2008 г. введен термин - *технические системы и устройства с измерительными функциями*, под которыми понимаются технические системы и устройства, которые наряду с их основными функциями выполняют измерительные функции.

Измерительной установкой называется совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких физических величин и расположенная в одном месте.

Измерительная информационная система (ИИС) представляет собой совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, вычислительных и других вспомогательных механических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству, преобразования и представления измерительной информации в требуемом виде, либо с целью автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации.

В зависимости от выполняемых функций ИИС разделяют на: измерительные (ИС), автоматического контроля (САК), технической диагностики (СТД), распознавания (идентификации) образов (СРО). В СТД, САК и СРО измерительная система входит как подсистема. Структурная схема ИИС показана на рис.2.17.

По организации алгоритма функционирования ИИС различают: системы с заданным алгоритмом, программируемые, адаптивные.

Наиболее применяемым методом проектирования ИИС является принцип агрегатно-модульного построения системы из унифицированных узлов. Агрегатно-модульный принцип предполагает применение стандартных интерфейсов, под которыми понимают как совокупность правил протоколов и ПО процессов обмена информации, так и технические средства сопряжения модулей в системе. В ИИС применяют унифицированные сигналы: непрерывный аналоговый, импульсный, кодово-импульсный, цифровой.

К ИС относят ИИС, в которых преобладает функция измерения, а функции обработки и хранения незначительны или отсутствуют. Основными элементами ИС являются: первичный измерительный преобразователь (датчик), элемент сравнения, мера, устройство выдачи результата (рис.2.18).

Системы АК осуществляют функции автоматического контроля за состоянием объектов. Различают системы непрерывного и дискретного контроля. Структурная схема САК показана на рис.2.19.

Системы технической диагностики (ТД) осуществляют функции механической диагностики состояния или прогноза поведения объекта. Системы этого типа довольно сложные как в алгоритмах функционирования, так и в алгоритмах обработки и интерпретации результатов измерений.

3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В любом первичном преобразователе (датчике) реализуется тот или иной *принцип измерения – физическое явление или эффект, положенные в основу измерения.*

Очевидно, что используемое явление или эффект должны однозначно определять измеряемую физическую величину.

Разнообразие физических явлений и эффектов, лежащих в основе принципов преобразования физических величин, накладывающееся на разнообразие собственно физических величин создает еще большее разнообразие первичных преобразователей ФВ. Всякое разнообразие требует упорядочения, в частности,

путем классификации по признакам. В области измерительных преобразователей в качестве признаков классификации могут служить: физический или иной эффект, принцип действия, вид передаваемого сигнала, назначение, объект контроля, вид физической величины и др. Предпочтение, отдаваемое тому или иному признаку, во многом определяется тем, для кого предназначена классификация. Например, разработчику удобнее классификация по используемым явлениям или эффектам, принципам действия. Потребителю, скорее подходит классификация по объектам контроля и видам ФВ.

Классификации измерительных преобразователей по принципам измерений и по измеряемым ФВ наиболее распространенные. При рассмотрении физических эффектов и принципов измерений преобразователи (датчики) подразделяют на: резистивные, емкостные, гальванические, пьезоэлектрические, фотоэлектрические (оптоэлектрические), электромагнитные, электрохимические (хемосенсоры), магнитоэлектрические, индуктивные (взаимоиндуктивные), термоэлектрические, ионизационные, электрохимические и др.

Поскольку нас больше интересуют объект контроля и ФВ, нам удобнее применить классификацию по виду ФВ. Отметим, что нас в большей степени интересуют преобразователи, позволяющие осуществлять дистанционные измерения.

3.1. Измерение времени (временных интервалов)

С древних времен в качестве естественного эталона интервала времени принимали период обращения Земли вокруг своей оси, позволяющий человеку достаточно хорошо ориентироваться на ее поверхности. С 1799 по 1960 гг. секунду определяли как $1/86400$ часть средних солнечных суток. Средние сутки определены с относительной погрешностью 10^{-7} . Такая точность недостаточна для современных потребностей техники, поэтому возникла необходимость в выборе нового естественного эталона времени, обеспечивающего более высокую точность воспроизведения единицы измерения времени, т. е. интервал ме-

жду двумя весенними равноденствиями, следующими одно за другим, принимается в качестве эталона.

Одиннадцатая Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 г. утвердила «астрономическое» определение основной единицы времени секунды как $1/31556925,9747$ часть тропического года для 1900 г. О (т.е. 31 декабря 1899 г. 12⁰⁰) января в 12 часов эфемеридного времени, которое привязывают ее не к вращению Земли вокруг своей оси, а к движению Земли по орбите вокруг Солнца. Тропический год для 1900 г. равен $365,24219878$ суток = $31556925,9747$ сек. Погрешность воспроизведения «эфемеридной секунды» достигает 10^{-9} и определяется точностью астрономических наблюдений, которая с развитием техники увеличивается. Этим временем пользуются в астрономии и в хозяйственных нуждах.

В обычной жизни применяют календарный год, воспроизводящий с большой точностью продолжительность тропического года. Календарный год равен $365,2425$ суток, т. е. длиннее тропического года на 26 сек, что за 3300 лет дает разницу в 1 сутки.

В 50-60-х годах 20-го столетия были созданы квантовые меры частоты. Сначала молекулярные (мазеры) – аммиачные, а затем атомные (лазеры) – цезиевые и водородные. Воспроизводимость частоты и единицы времени возросла в 100-1000 раз по сравнению с эфемеридной секундой. На тринадцатой ГКМВ в 1967 году было принято новое определение секунды как промежутка времени, в течение которого совершается $9\ 192\ 631\ 770$ колебаний, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133. Государственный первичный эталон единицы времени одновременно является и эталоном единицы частоты (Герц). Частота водородного репера ниже, чем цезиевого. Водородные реперы выполняют роль эталона – копии. Неконтролируемое смещение частоты цезиевого репера составляет 410^{-13} .

Государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы времени и частоты воспроизводит и хранит:

- единицу времени, «атомную» секунду;
- единицу частоты, Гц;
- шкалы «атомного» времени РФ;
- шкалы координированного времени РФ.

Структура ГПЭ приведена на рис. 3.1, а схемы Цезиевого и Водородного реперов – на рис. 3.2 и 3.3.

Измерение интервалов времени в технике

Колебательные контуры

Для измерения интервалов времени в технике также используются периодические процессы. В том числе, колебательные или вращательные, для чего можно применить любую колебательную систему, например, механическую или электрическую.

В механических маятниковых системах возможно достижение точности хода 0,002 – 0,003с в сутки, а с системами с вращающимся подпружиненным маятником – до 0,1 с в сутки.

Колебательный контур, состоящий из идеальных емкости C и индуктивности L , имеет круговую частоту автоколебаний, равную $\omega=(LC)^{-1/2}$. С такой частотой меняется ток в катушке или напряжение на обкладках конденсатора. Таким образом, в контуре возникают гармонические колебания, которые могут быть использованы для измерения времени. Так как элементы любой электрической цепи обладают активным сопротивлением, то часть энергии теряется в виде тепла и колебания носят затухающий характер. Пополнение энергии в таких генераторах производится за счет энергии источника питания.

Кварцевые часы

Для более точного измерения интервалов времени в технике широко применяется пьезоэлектрический эффект на кварце. Если к кристаллу кварца приложить электрическое напряжение, то под воздействием обратного пьезоэлектрического эффекта он деформируется. Если затем напряжение убрать, то в

кристалле возникнут колебания - электрическая энергия будет преобразовываться в механическую и обратно. Каждый кристалл имеет собственную частоту колебаний, или резонансную частоту, которая зависит от его формы и физических размеров. Подбирая форму и размеры кристалла, можно получить любую заданную резонансную частоту.

Кристалл кварца в металлическом корпусе с выведенными наружу контактами называют кварцевым резонатором. Кварцевый резонатор является основой генератора, вырабатывающего колебания постоянной частоты. Основываясь на этих колебаниях, электронная схема посылает импульсы на шаговый двигатель, который через систему колес вращает стрелки часов.

Двумя важнейшими характеристиками кварцевого генератора являются температурная и временная стабильность частоты. Именно от них зависит точность хода кварцевых часов. Стабильность частоты кварцевых часов оценивается приблизительно в 10^{-9} . Именно кварцевые часы позволили зафиксировать нерегулярность вращения Земли (примерно 10^{-8}), что потребовало уточнения определения секунды.

Кроме систем, основанных на периодических процессах, для измерения времени используются системы, основанные на принципе накопления. Эти системы могут быть механическими, электрическими, радионуклидными. Простейшие и древнейшие примеры систем накопления – песочные и водяные часы.

В электрических системах обычно используются процессы накопления заряда на обкладках конденсатора.

Из радионуклидных наиболее известен радиоуглеродный метод определения времени. Суть метода заключается в том, что в окружающей среде изотопы углерода находятся в радиоактивном равновесии. Это означает, что доля радионуклида ^{14}C в смеси изотопов (^{12}C и ^{13}C) известна и стабильна. Она одна и та же в природе и в живых организмах, обменивающихся углеродом с окружающей средой. После гибели животного или растительного организма этот обмен прекращается и содержание изотопа ^{14}C в тканях начинает уменьшаться

в соответствии с периодом полураспада, равным 5730 ± 40 лет. По его относительному содержанию на момент анализа и можно оценить время, прошедшее после гибели организма.

3.2. Измерение состава вещества

Хроматографические методы

Хроматографией называют метод разделения смесей на составляющие компоненты при прохождении подвижной фазы через неподвижную фазу. Исследуемый образец вводится в подвижную фазу (носитель) и при помощи её переносится через неподвижную фазу (сорбент). Компоненты образца по-разному взаимодействуют с неподвижной фазой и, в результате различного селективного удержания (в основном по механизму адсорбции), разделяются по длине колонки. Удержание зависит от молекулярных сил: ионных, связанных с электрическим зарядом молекул; полярных, обусловленных электрической поляризацией молекул; дисперсионных, характерных для углеводородных соединений. Носитель может быть жидкостью и газом, сорбент – жидким или твёрдым веществом. Достаточно высокая степень автоматизации достигнута в методах газовой и жидкостной хроматографии.

Принципиальная схема хроматографа проста (рис. 3.4). Процесс хроматографического анализа состоит из нескольких стадий: Проба в узле ввода смешивается с носителем и поступает в так называемую хроматографическую колонку. В колонке, в определённых температурных условиях и при определённых режимах прокачки компоненты пробы адсорбируются на материале колонки, в основном локально распределяясь по её длине. На стадии детектирования в колонке создаются определённые температурные условия, при которых адсорбированные ранее компоненты элюируют и доставляются носителем в детектор. Каждый компонент пробы регистрируется детектором не одновременно. Хроматограммы представляют собой запись последовательности пиков разной интенсивности; номер пика указывает на вещество, а высота и площадь –

на количество его в пробе. На заключительной стадии хроматографического анализа производится обработка хроматограммы и определение состава пробы.

Разделение компонентов пробы в пространстве (по длине колонки) и во времени (по времени прохождения через детектор) позволяет использовать различные принципы их детектирования. Этим объясняется большое разнообразие применяемых на практике детекторов:

ДТП – катарометр (по теплопроводности);

ГВ – газовые весы (по плотности);

УЗД – ультразвуковой;

ПВД – пламенно-ионизационный;

ПФД – пламенно-фотометрический;

ФВД – фото-ионизационный;

ТВД – термо-ионизационный;

МС – масс-спектрометрический;

ИКС – инфракрасный спектрометр;

ААС – атомно-абсорбционный спектрометр;

ЭДХ – электролитический детектор Холла

и др.

Как правило, детекторы не универсальны и предназначены для анализа смесей каких-то определённых веществ.

Качество измерений в хроматографическом анализе определяется диапазоном измерений, линейностью характеристики, пределом обнаружения. Размерность предела обнаружения потоковых и концентрационных детекторов различна: в первом случае она выражается в г/с, во втором – в г/мл. Типичные характеристики (приблизительные) для нескольких распространённых видов детекторов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики хроматографических детекторов

Тип детектора	Предел обнаружения	Динамический диапазон (линейный)
ДТП	10^{-9} г/мл	$10^4 - 10^5$
ПВД	10^{-12} г/с	10^6

ПФД	10^{-12} г/с	10^5
ЭДХ	10^{-13} г/с	10^6

Первым хроматографическим детектором был катарометр. Принцип его действия заключается в измерении (сравнении) электрического сопротивления резисторов, включённых в мостовую схему (мост Уитстона), помещаемых в носитель, содержащий и не содержащий компонент пробы, и нагреваемых одинаковым током. Различная теплопроводность газов обуславливает разный нагрев резисторов, и, следовательно, их разное электрическое сопротивление. Разбаланс сопротивлений и является информативным сигналом детектора. У этих детекторов не очень высок предел обнаружения и мало быстродействие (время отклика составляет 0,5 – 5 с).

Очень широкое применение в анализе состава органических соединений нашли детекторы ПИД. В детекторе происходит ионизация газа в слабом пламени горящей на конце капиллярного сопла водородно-воздушной смеси в электрическом поле разностью потенциалов примерно 300В. Степенью ионизации компонента пробы определяется величина тока утечки, которая и является информативным сигналом детектора. В детекторе ФИД ионизация газа происходит не в пламени, а под воздействием УФ – излучения энергией 9,5 – 11,7 эВ.

В масс-спектрометрических хроматографах детектором является собственно масс-спектрометр, в камере напуска которого элюент ионизируется и поступает в отклоняющую трубку, как в обычном масс-спектрометре.

В жидкостной хроматографии чаще применяется детектирование по интенсивности поглощения ультрафиолетового излучения в различных диапазонах длин волн (спектрофотометры и фотодиоды), по изменению показателя преломления носителя, содержащего компонент пробы.

В газовой хроматографии носителями пробы служат гелий, аргон и азот. Хроматографическая колонка в газовом хроматографе должна быть достаточно длинной для эффективного разделения компонентов пробы. Как правило, она выполняется в виде спиральной трубки. Газовые хроматографы должны позво-

лять уверенно регистрировать содержание компонента в бинарной смеси в широком диапазоне: от 10^{-3} до 10^{-12} весовых долей.

Чувствительность хроматографа, как правило, определяют по отношению площади или высоты пика к массе пробы. Хроматографы обязательно калибруются по стандартным калибровочным смесям.

Некоторые, особенно современные и чувствительные из перечисленных выше методов детектирования могут применяться для анализа состава пробы непосредственно, без хроматографического разделения компонент.

Электрохимические методы

Эти методы основаны на измерении электрических потенциалов и электропроводности и распространены для определения концентрации вещества в жидкой пробе. Измеряя электрическое сопротивление между двумя электродами, погруженными в электролитическую жидкость на определённом расстоянии друг от друга, можно определить концентрацию известных ионов в анализируемой пробе. Сопротивления могут измеряться по мостовой схеме. Такие приборы калибруются по стандартным растворам (например, раствор хлорида кальция).

Измерение электрических потенциалов производится в гальванических ячейках (рис. 3.5), содержащих стандартный и ион - селективный электроды, между которыми устанавливается разность потенциалов, зависящая от концентрации ионов данного вещества в электролите. В качестве стандартных электродов обычно применяют серебро в хлориде серебра, ртуть в хлориде ртути. Ион - селективные электроды разработаны для многих ионов: водород, натрий, калий, свинец, йод и др.

Спектрометрические методы

Спектрометрические методы применяются как в составе хроматографов, так и самостоятельно. Существует несколько групп методов спектрометрии:

Методы поглощения излучения (ультрафиолет, видимый свет, инфракрасный диапазон) основаны на измерении интенсивности излучения, поглощаемого молекулами пробы. Прошедшее через пробу излучение регистрируется фотодетектором (фотодиоды, фотоумножители, фотоэмиссионные детекторы). В качестве источника ультрафиолетового излучения применяют разрядные лампы с водородом или дейтерием. В качестве источников видимого света и инфракрасного излучения – различные лампы накаливания. В спектрометрах поглощения применяют метод сравнения с эталонным образцом. Метод поглощения в инфракрасном диапазоне даёт возможность идентифицировать химические соединения. В зависимости от требуемого участка спектра, источниками инфракрасного излучения могут быть лампы накаливания с вольфрамовой нитью (длина волны излучения 0,8 - 2,5 мкм), с нитью из нихрома (длина волны излучения 2,5 - 50 мкм), ртутно-дуговая лампа высокого давления (длина волны излучения 50 - 1000 мкм) и др.

Принцип действия атомно-эмиссионных спектрометров (АЭС – самый распространенный экспрессный метод) основан на регистрации электромагнитного излучения, испускаемого возбужденными электронами атомных оболочек. Возбуждение атомов происходит в процессе сжигания образца в пламени газовой горелки (в плазме, в электрической дуге). Излучение длиной волны 200 – 1000 нм регистрируется фотодетектором. Этот метод обладает высокой чувствительностью к идентификации всех металлических элементов.

Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) применяется для количественного анализа элементов в образце. Атомы исследуемого вещества поглощают резонансное излучение от вакуумной лампы с полым катодом. С помощью монохроматора (дифракционная решётка) выделяется и фотодетектором регистрируется та часть спектра излучения атомов образца, которая появилась на резонансной линии излучения лампы. Этот метод отличается экспрессностью.

Флуоресцентная спектрометрия основана на регистрации излучения атомов или молекул, испускаемого ими в процессе снятия возбуждения, вы-

званного поглощением излучения от ксеноновой или ртутной лампы. Как и в предыдущих методах, в этом методе исследуемое вещество атомизируется в пламени, а требуемые диапазоны излучаемых и регистрируемых длин волн обеспечиваются применением фильтров или дифракционных решёток. Флуоресцентная спектрометрия – высокочувствительный метод количественного анализа элементов и их соединений.

В масс-спектрометрическом методе молекулы и ионы идентифицируются по величине отношения массы к заряду. Это очень чувствительный и точный метод. А поскольку он не абсолютный, то, как и предыдущие, требует калибровки. Принцип действия масс-спектрометра заключается в следующем: анализируемое вещество испаряется в системе ввода пробы, поступает в камеру, где атомы вещества ионизируются одним из известных способов, например, бомбардировкой электронами, затем они ускоряются в электрическом поле и разделяются по кинетической энергии, затем в магнитном поле ионы разделяются по величине отношения масса/заряд и, наконец, регистрируются электронным умножителем (вызывая эмиссию электронов при бомбардировке металлической пластины) или иным способом.

Термические методы

Эти методы включают в себя нагрев или охлаждение образца, параллельно с которым измеряются какие – либо зависящие от температуры свойства. Основных термических методов два:

Дифференциальный термический анализ, заключается в нагреве образца и инертного эталонного материала в двух ячейках нагревательного блока с одной и той же скоростью и регистрации разницы температур в образце и эталоне (обычно с помощью дифференциальной термопары). Это позволяет регистрировать физико-химические изменения в образце, сопровождающиеся выделением или поглощением тепла. Метод применяется для анализа термической стабильности и построения фазовых диаграмм состояния вещества.

Термогравиметрический метод анализа заключается в нагреве пробы с заданной скоростью в инертной или реакционной среде с одновременным контролем изменения её массы. Изменение массы контролируется высокоточными весами в сравнении с массой эталонного термически стабильного образца. Это необходимо для исключения влияния температуры на результаты измерений. В процессе нагрева в образце происходят физико-химические превращения, приводящие к испарению и улетучиванию компонентов анализируемого вещества. В результате анализа появляется график зависимости веса пробы от температуры, что позволяет судить о термической стабильности исследуемого многокомпонентного вещества и о содержании в нём компонентов с разной степенью летучести или термической стабильности. Установки для термогравиметрического анализа довольно сложны, поскольку в них требуется обеспечить измерение веса, а также контроль и поддержание температуры с высокой точностью. В отечественной практике для этих целей применялись модификации установки «Дериватограф» на предельные температуры 1000 °С и 1500 °С.

В настоящее время насчитывается более 200 инструментальных методов количественного анализа состава веществ. Большая часть из них предназначена для определения одного или нескольких компонент в составе образца.

Развитие микроэлектроники и точной механики обеспечило появление и распространение зондовых методов анализа поверхностных слоев (глубина - от долей нанометра до нескольких атомных слоев) материалов. Зондирующие методы основаны на воздействии излучением, электромагнитным полем или корпускулярными частицами на поверхность образца и регистрации эмитируемых вторичных частиц или излучений, содержащих информацию о природе частиц поверхностного слоя, их количестве, пространственном распределении и энергетическом состоянии. К наиболее распространенным зондовым методам относятся: рентгеноспектральный микроанализ, электронная спектроскопия для химического анализа и Оже - спектроскопия. Возбуждение атомов поверхности образца происходит под воздействием рентгеновского излучения или пучка высокоэнергетических электронов.

Лазерные спектрометры

Высокая плотность энергии, монохроматичность и локальность лазерного излучения позволяют исследовать спектры облучаемой среды: спектры поглощения, комбинационного рассеяния, флюоресценции. И, что особенно важно, лазерные методы могут применяться не только для анализа проб, но и для анализа реальных объектов (например, атмосфера).

Лазерный абсорбционный измеритель малых концентраций в газовых смесях

Схема лазерного измерителя приведена на рис. 3.6.

Лазерный луч, проходящий кювету, попадает в фотоприемник. От соотношения длин волн лазерного излучения и линий поглощения зависит наличие в сигнале, регистрируемом фотоприемником, постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая выделяется ФНЧ, а переменная – СУ. Их отношение характеризует концентрацию компонент, как правило, бинарных смесей. Если смеси более сложные, то нужно изменять частоту лазерного излучения. Чувствительность метода высокая: $10^{-8} - 10^{-9}$, динамический диапазон измеряемых концентраций – 10^7 .

Лазерный измеритель комбинационного рассеяния

Мощные аргоновые лазеры (мощность накачки до 10 Вт) используются для реализации метода комбинационного рассеяния в определениях концентраций компонент газовых смесей (рис. 3.7). Комбинационное рассеяние (эффект Рамана) — неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твёрдого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением его частоты. В отличие от рассеяния Рэлея (упругое рассеяние), в случае комбинационного рассеяния света в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, которых нет в спектре первичного (возбуждающего) света. Число и расположение появившихся линий определяется молекулярным строением вещества.

Чувствительность метода $10^{-5} - 10^{-6}$ относительных концентраций.

3.3. Измерение температуры

Нас будут интересовать, в основном, измерения положительных (по шкале Цельсия) температур, поскольку мы гораздо чаще имеем дело с объектами, в которых реализуются повышенные температуры.

В температурных измерениях, как уже говорилось ранее, важно установить как единицу температуры, так и её шкалу.

Самой совершенной, с точки зрения физической парадигмы, является термодинамическая температура. Последняя версия шкалы, максимально приближенная к термодинамической температуре, принята на 17-й сессии Консультативного комитета по термометрии Парижской палаты мер в конце 1989 года. С 1990 года новая шкала МТШ-90 (ITS-90) заменила предыдущую версию МПТШ-68 и ПТШ-76. В России она введена в практику измерений с введением в 1993 году Государственной поверочной схемы для средств измерения температуры.

В МТШ-90 установлена единица температурной шкалы: $1\text{К} = 1/273,16$ часть разницы температур абсолютного нуля и температуры тройной точки воды. Термодинамическая температура тройной точки воды точно равна 273,16 К. реализация тройной точки воды основана на том, что разница между температурой плавления и тройной точкой воды точно равна 0,01 К. Воспроизведение температурной шкалы осуществляется по основным точкам, за которые в МТШ-90 приняты:

1. Точка кипения гелия, 3-5 К
2. Тройная точка водорода, 13,8033 К
3. Точка кипения водорода, ≈ 17 К при давлении 33,33 кПа
4. Точка кипения водорода, $\approx 20,3$ К при нормальном давлении
5. Тройная точка неона, 24,5561 К
6. Тройная точка кислорода, 54,3584 К

7. Тройная точка аргона, 83,8058 К
8. Тройная точка ртути, 234,3156 К
9. Тройная точка воды, 273,16 К
10. Точка плавления галлия, 302,9146 К
11. Точка затвердевания индия, 429,7485 К
12. Точка затвердевания олова, 505,078 К
13. Точка затвердевания цинка, 692,677 К
14. Точка затвердевания алюминия, 933,473 К
15. Точка затвердевания серебра, 1234,93 К
16. Точка затвердевания золота, 1337,33 К
17. Точка затвердевания меди, 1357,77 К

Воспроизведение температурной шкалы в промежутках между основными точками (интерполяция) осуществляется эталонными средствами, в том числе:

- платиновым термометром сопротивления в диапазоне температур от тройной точки водорода 13,8033 К до точки затвердевания серебра 1234,93 К;
- оптическим пирометром, реализующим закон излучения Планка (излучение абсолютно черного тела в вакууме), при температурах выше точки затвердевания серебра.

Рассмотрим основные принципы и средства измерения температуры.

3.3.1. Контактные методы измерения температуры

Термометры расширения

В термометрии расширения используется физическое явление изменения размеров твердого, жидкого или газообразного тела при изменении его температуры.

Дилатометры – термометры, в которых изменение температуры преобразуется в изменение длин или разницы длин двух тел с различными темпера-

турными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). Обычно для твердых тел справедливо примерное равенство:

$$l_T = l_0(1 + \alpha T),$$

где α - ТКЛР; T – температура.

Дилатометры выпускают для нескольких диапазонов температур в интервале от -30 до $+1000$ °С. Предел приведенной допускаемой основной погрешности дилатометров составляет 1,5-2,5%. Дилатометры достаточно широко применяют в системах регулирования температуры в печах сопротивления в качестве реле-регулятора.

Для этих же целей в различных системах регулирования и поддержания температуры применяют **биметаллические термометры**.

Изгиб свободного (не закрепленного) конца биметаллической пластины приводит к его перемещению

$$n = \gamma l^2 \Delta T / s,$$

где ΔT – изменение температуры; l - длина пластины; s – толщина пластины; γ - удельный изгиб пластин (на градус), зависящий в основном от разности ТКЛР использованных в пластине металлов.

Основная приведенная погрешность подобных термометров составляет 1,0-1,5%, а в области повышенных температур – до 3%. Серьезным недостатком биметаллических термометров является необходимость их индивидуальной градуировки. Отсутствие воспроизводимости делает невозможной унификацию и стандартизацию НСХ.

Жидкостные термометры широко распространены в лабораторной практике. Простота, малая стоимость и приемлемая точность – основные достоинства жидкостных термометров. Диапазон измеряемых температур от -35 до $+650$ °С. В низкотемпературных жидкостных термометрах предел допускаемой основной погрешности составляет десятые и даже сотые доли градуса.

В **манометрических термометрах** используется эффект изменения с температурой давления термометрического вещества в замкнутом объеме. Различают манометрические термометры трех типов: жидкостные, паровые (кон-

денсационные) и газовые. Жидкостные термометры применяются в диапазоне от -5 до $+300$ $^{\circ}\text{C}$, газовые от -50 до $+600$ $^{\circ}\text{C}$, конденсационные от -25 до $+300$ $^{\circ}\text{C}$. Основными элементами манометрических термометров являются: термобаллон, капилляр и манометрическое устройство. Класс точности подобных средств измерений от 1 (для жидкостных) до 4 (для конденсационных).

Термометры сопротивления

В средствах измерения температуры этого класса используется зависимость от температуры электрического сопротивления постоянному току металлов, их сплавов и других материалов.

Удельное электрическое сопротивление чистых металлов в широком диапазоне температур определяется в основном механизмом электронно-фононного взаимодействия. С увеличением температуры усиливается рассеяние электронов на фононах и уменьшается длина свободного пробега электрона. Для большинства металлов это приводит к линейной или квадратичной зависимости удельного электросопротивления от температуры (за исключением очень низких температур).

Для чистых металлов зависимость сопротивления от температуры t обычно описывается соотношением вида: $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Значения ТКС некоторых металлов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

ТКС металлов

Металл	Удельное сопротивление при 20°C , 10^{-6} Ом*см	ТКС при 0°C , $10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$	Интервал измеряемых температур, $^{\circ}\text{C}$	Рабочая среда
Платина	9,81	3,92	-258+1000	воздух
Медь	1,67	4,26	-258+800	воздух до 180°C
Никель	6,84	4,30	-182+500	воздух
Железо	9,71	6,51	-252+800	нейтральная
Серебро	1,68	4,03	-258+600	воздух
Золото	2,07	4,5	-258+800	воздух
Вольфрам	2,78	7,5	до 3000	нейтральная
Молибден	5,03	4,7	до 2000	нейтральная

В сплавах, как правило, температурные коэффициенты сопротивления значительно ниже, чем в металлах, поскольку в них добавляется рассеяние электронов на примесных атомах.

Самым точным, стабильным и универсальным является термометр сопротивления из чистой платины. Погрешность платинового термометра, включенного в состав эталонных средств воспроизведения температурной шкалы, не превышает $\pm 0,01$ мК в тройной точке воды. Для технических измерений ТСП по точности делятся на классы: А, $\pm 0,05\%$; В, $\pm 0,1\%$; С, $\pm 0,2\%$.

В качестве чувствительных элементов термометров сопротивления для технических и специальных целей применяют чистую электротехническую медь, никель, сплавы никель-железо, манганин и др. Чувствительность резистивных термометров к температуре характеризуется отношением сопротивлений при 100°C (R_{100}) и при 0°C (R_0); $W_{100}=R_{100}/R_0$. Для платиновых ТСП $W_{100}=1,385-1,392$, для никелевых – $1,617$ и медных – $1,427$. (ГОСТ Р 6651 Термометры сопротивления из платины, меди, никеля. ОТТ и методы испытаний; IEC 60751 Технические платиновые ТС и температурные датчики).

В диэлектриках, по большей части, электрическое сопротивление уменьшается с ростом температуры. Это связано с увеличением свободных носителей заряда. Для диэлектриков с проводимостью n-типа удельное электрическое сопротивление $\rho \sim \exp(E/2kT)$ (рис.3.8).

Полупроводниковые ТС (терморезисторы) имеют высокий ТКС: $3,5 - 8,5\%$ на градус. Температурная зависимость сопротивления обычно представляется в виде: $R_t = R_0 \exp[-b(t - t_0)]$.

В узком диапазоне температур можно использовать линейную функцию, описывающую зависимость сопротивления от температуры с относительной погрешностью $\pm 20\%$.

Резистивные преобразователи сопротивления являются параметрическими датчиками и требуют внешнего источника питания. Измерительная цепь ТС может быть реализована в различных схемах: двух и четырехпроводной, ком-

пенсационной, мостовой и др. Полупроводниковые резистивные преобразователи температуры называют терморезисторами или термисторами.

Чувствительность термометров сопротивления с чувствительными элементами из полупроводников очень высока. Однако температурная зависимость электросопротивления полупроводников, как правило, нелинейна, а стабильность их характеристик невысока из-за необратимых изменений вследствие старения.

Для терморезистора характерны большой температурный коэффициент сопротивления (ТКС) (в десятки раз превышающий этот коэффициент у металлов), простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках. Терморезистор изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии; их размеры могут варьироваться в пределах от 1-10 мкм до 1-2 см. Основными параметрами терморезистора являются: номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, интервал рабочих температур, максимально допустимая мощность рассеяния.

Различают терморезисторы с отрицательным и положительным ТКС. Терморезисторы с отрицательным ТКС изготавливают из смеси поликристаллических оксидов переходных металлов (например, MnO , CoO , NiO , CuO), легированных Ge и Si , полупроводников типа $A^{III} B^V$, стеклообразных полупроводников и других материалов.

Различают терморезисторы низкотемпературные (рассчитанные на работу при температуре ниже 170 К), среднетемпературные (170-510 К) и высокотемпературные (выше 570 К). Кроме того, существуют терморезисторы, предназначенные для работы при 4,2 К и ниже и при 900-1300 К. Наиболее широко используются среднетемпературные терморезисторы с ТКС от - 2,4 до -8,4% K^{-1} и номинальными значениями сопротивления $1-10^6$ Ом.

Режим работы терморезисторов зависит от того, на каком участке статической вольт - амперной характеристики (ВАХ) выбрана рабочая точка. В свою

очередь ВАХ зависит как от конструкции, размеров и основных параметров терморезистора, так и от температуры и теплопроводности окружающей среды, теплообмена между терморезистором и средой. В полупроводниковых термометрах используется зависимость от температуры параметров $p-n$ перехода. Общий вид ВАХ терморезистора и $p-n$ перехода показаны на рис. 3.9.

Значение обратного тока диода увеличивается с ростом температуры по экспоненциальному закону. Однако использование обратных токов ограничено тепловым пробоем.

Более распространено использование прямых параметров – прямого напряжения на $p-n$ переходе и коэффициента усиления по току на определенных частотах. Однако применение коэффициента усиления по току в качестве температурозависимого параметра ограничивается невысокой чувствительностью.

Всё более широкое применение в технике находят миниатюрные полупроводниковые терморезисторы с двух- и четырёхпроводными схемами измерения сопротивления.

Эквивалентная схема цепи с линейным активным двухполюсником и нелинейным резистивным элементом, каковым и является терморезистор, и рабочая точка характеристики приведены на рис. 3.10.

Уравнения состояния цепи по рис. 3.10: $E = U_X$; $I_K R_{BX} = U_X$; $U = E - I R_{BX}$.

Терморезисторы с рабочей точкой на начальном (линейном) участке ВАХ используются для измерения и контроля температуры и компенсации температурных изменений параметров электрической цепей и электронных приборов. Терморезисторы с рабочей точкой на нисходящем участке ВАХ (с отрицательным сопротивлением) применяются в качестве пусковых реле, реле времени, измерителей мощности электромагнитного излучения на СВЧ, стабилизаторов температуры и напряжения.

Из терморезисторов с положительным температурным коэффициентом наибольший интерес представляют терморезисторы, изготовленные из твёрдых растворов на основе $BaTiO_3$. Такие терморезисторы обычно называют позисторами. Известны терморезисторы с небольшим положительным температурным

коэффициентом (0,5-0,7 % K⁻¹), выполненные на основе кремния с электронной проводимостью; их сопротивление изменяется с температурой примерно по линейному закону. Такие терморезисторы используются, например, для температурной стабилизации электронных устройств на транзисторах.

Термоэлектрические термометры

В основе термоэлектрической термометрии лежит эффект возникновения термоэлектродвижущей силы в замкнутой цепи из двух разнородных проводников с различной температурой в местах их соединений (эффект Зеебека).

Наиболее распространенное объяснение эффекта возникновения т.э.д.с. дается на основе теории электронной проводимости, согласно которой разность потенциалов в контактирующих металлах обусловлена разностью концентраций свободных электронов и их концентрационной диффузией, сбалансированной обратным током под воздействием возникающего электрического поля.

Т.э.д.с. идеальной термопары, состоящей из проводников А и В и имеющей на концах температуры T₁ и T₂:

$$E = \frac{k}{e} \int_{T_1}^{T_2} \ln \frac{n_A}{n_B} dT, \text{ где } k \text{ – постоянная Больцмана; } e \text{ – заряд электрона; } n_A, n_B \text{ – кон-}$$

центрация свободных электронов в проводниках А и В.

При слабом изменении концентраций свободных электронов от температуры, $E \sim \Delta T$.

Термоэлектрический метод измерения температуры наиболее распространен в технике и научных исследованиях. Существенное достоинство этого метода заключается в том, что реализующие его термоэлектрические преобразователи являются генераторными датчиками (источниками ЭДС), не требующими внешнего источника питания.

Схема термоэлектрического преобразователя температуры показана на рис. 3.11. Термоэлектрические преобразователи температуры подключаться совместно с целью суммирования (батарея термопар) или вычитания (дифференциальная термопара) сигнала.

Материалы термоэлектродов

Термоэлектродные материалы, являющиеся основными элементами преобразователя температуры, представляют собой широкий спектр материалов от низкоплавких до тугоплавких металлов, их сплавов и керамик (табл. 3.3). Температура плавления термоэлектродов должна быть выше максимальной температуры применения преобразователя на 200-300°C. Механические и теплофизические свойства важны при конструировании преобразователя. Роль удельного электросопротивления термоэлектродов важна с точки зрения влияния шунтирования при высоких температурах из-за увеличивающейся электропроводности керамики.

Таблица 3.3

Характеристики термоэлектродных пар

Тип термопары	Материал термоэлектрода		Максимальная рабочая температура применения, °С		Дифференциальная ТЭДС, мкВ/град
	+	-	длительного	кратковременного	
L	Никель-хром (хромель)	Медь-никель (копель)	600	800	63-84 (0-800°C)
E	То же	Медь-никель (константан)	700	900	59-77 (0-800°C)
K	То же	Никель-алюминий (алюмель)	1000	1300	41-35 (0-1300°C)
N	Никель-хром-кремний (нихросил)	Никель-кремний (нисил)	1300	1300	26-36 (0-1300°C)
I	Никель-хром-кремний (силх)	Никель-кремний (силин)	1200	1300	42-35 (200-1300°C)
T	Медь	Медь-никель (константан)	400	400	39-62 (0-400°C)
J	Железо	То же	700	900	50-62 (0-900°C)
S	Платина-10% родия	Платина	1300	1600	5-12 (0-1600°C)
B	Платина-30% родия	Платина-6% родия	1600	1800	1-12 (100-1800°C)
A	Вольфрам-5% рения	Вольфрам-20% рения	2200A ₁ 1800 (A ₂ , A ₃)	2500	16-8 (1000-2500°C)

Приведенная погрешность образцовых (эталонных) и рабочих средств измерения температуры составляет от 0,25 до 3%.

Для передачи и преобразования сигнала термоэлектрического термометра применяют любые измерительные цепи, предназначенные для работы с источником электрического напряжения.

Подбор термоэлектродных пар, в первую очередь, определяется величиной термоЭДС материала относительно стандартного электрода, функцию которого выполняет чистая платина (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Термо ЭДС металлов и сплавов относительно платины при $T=100^{\circ}\text{C}$ и $T_0=0^{\circ}\text{C}$

Материал	ЭДС, мВ/100 $^{\circ}\text{C}$	Материал	ЭДС, мВ/100 $^{\circ}\text{C}$
Платина	0	Молибден	+1,31
Хромель	+2,95	Вольфрам	+0,79
Копель	-4,0	Палладий	-0,57
Алюмель	-1,2	Серебро	+0,72
Медь	+0,75	Железо	+1,8
Константан	-3,4	Никель	-1,52
Платиноиридий (90/10)	+1,3	Нихром	+2,0
Платинородий (90/10)	+0,64	Золото	+0,8

Для измерений высоких температур (до 3000°C) в качестве термоэлектродных материалов используют различную керамику SiC-C (250 мкВ/град); TiC-C (более 50 мкВ/град); ZrV₂-C (50 мкВ/град).

НД по термоэлектрическим преобразователям температуры: ГОСТ 8.585-2001. ГСОЕИ. Термопары. НСХ преобразования; IEC 60584.1,2,3 (ссылочные таблицы (1); допуски (2); удлинительные и компенсационные провода (3)).

Помимо проволочных и керамических применяют пленочные термоэлектроды. Последние чаще всего получают методом вакуумного напыления на изолятор.

Материалы межэлектродной изоляции термоэлектрических преобразователей

Материал электрической изоляции термоэлектрического преобразователя должен иметь высокую температуру плавления, высокую термическую стабильность и термостойкость. Совместимость с материалами термоэлектродов, устойчивость к воздействию рабочей среды при повышенной температуре, технологичность, достаточные электроизоляционные свойства при максимальной

температуре. Кроме того, этот материал не должен загрязнять термоэлектродные материалы и иметь при этом приемлемые для создания конструкций теплофизические и механические свойства.

Снижение сопротивления межэлектродной изоляции приводит к шунтированию электрической цепи и снижению измеряемого напряжения. В простейшем случае уменьшение измеряемого значения ТЭДС равно:

$$\Delta U = U_{AB} / (1 + R_{из} / R_{тп}),$$

где U_{AB} - ТЭДС термопреобразователя;

$R_{из}$, $R_{тп}$ – сопротивление межэлектродной изоляции и термопреобразователя соответственно.

Погрешность измерения, обусловленная шунтированием, например, в вольфрамениевых термопреобразователях с изоляцией из ThO_2 может достигать $200^{\circ}C$ при измеряемой температуре $2500-3000^{\circ}C$.

В качестве межэлектродной изоляции наиболее часто применяют оксидные соединения металлов, реже - бескислородные соединения неметаллов.

Некоторые характеристики оксидов, используемых в качестве высокотемпературной изоляции термопреобразователей, приведены в табл. 3.5.

Важное свойство межэлектродной изоляции – совместимость с материалами термоэлектродов. Данные по совместимости электроизоляционных керамик с металлическими термоэлектродами и рекомендации по пределам их применения приведены в табл. 3.6.

Приведенные в табл. 3.6 значения предельных температур совместимости керамик с вольфрамом и молибденом в водороде на $200^{\circ}C$ выше, а в вакууме и инертной среде – на $100-200^{\circ}C$ ниже.

Сведения о совместимости носят приближенный характер, поскольку интенсивность взаимодействия зависит от состояния материала, примесей, окружающей среды и т.п.

По комплексу свойств наилучшие оксидные изоляторы для высокотемпературных термопреобразователей при температурах выше $1500^{\circ}C$ это BeO и ThO_2 .

В табл. 3.7 приведены сведения об инструментальных погрешностях термоэлектрических преобразователей температуры.

Таблица 3.5

Характеристики материалов термоэлектродной изоляции

Материал	Химическая формула	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$ (округленно)	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Термостойкость
Кварц полиморфный	SiO_2	1480	50-100 при $t=1300^\circ\text{C}$	Отличная
Кварцевое стекло	SiO_2	1710		
Тридимит	SiO_2	1670		
Кристаллит	SiO_2	1700		
Кремнезем кристаллический	SiO_2	1730		
Муллит	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1830		
Глинозем, корунд	Al_2O_3	2020-2050	10^4 при $t=1100^\circ\text{C}$, $10 \cdot 10^3$ при $t=1400^\circ\text{C}$	Очень хорошая
Шпинель	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2110		
Циркон	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	2400-2420		
Диоксид титана	TiO_2	1780-1800		
Оксид бериллия	BeO	2440-2570	$3,5 \cdot 10^8$ при $t=1600^\circ\text{C}$, 8-80 при $t=2100^\circ\text{C}$	Отличная
Диоксид циркония	ZrO_2	2600-2900	$10^{-1} - 10^{-2}$ при $t=2000^\circ\text{C}$	Хорошая
Оксид магния	MgO	2500-2640	5 при 2000°C	Слабая
Магнезия, периклаз	MgO	2800-2900		
Диоксид тория	ThO_2	2950-3300	15 при 1800°C	
Оксид иттрия	Y_2O_3	2410-2440	3-30 при 1500°C	
Диоксид гафния	HfO_2	2780	-	-
Нитрид бора	BN	3000	10^2 при $t=2000^\circ\text{C}$	Хорошая
Карбонитрид бора	BCN	-	10^2 при $t=2000^\circ\text{C}$	

Таблица 3.6

Совместимость керамик с материалами термоэлектродов

Изолятор	Сведения о совместимости с металлами	Максимальная температура применения, $^\circ\text{C}$
SiO_2	Совместим с вольфрамом до 1600°C , с молибденом до 1500°C	До 1600
MgO	Совместим с вольфрамом до 2000°C , с молибденом до 1800°C , менее стоек в контакте с металлами, чем Al_2O_3	До 1300 в кабельных термопарах в виде порошка, до 2000 в виде соломки и бус
Al_2O_3	Совместим с вольфрамом и молибденом до 2000°C , с платиной, родием, рением, вольфрамом/рением до $1800-1900^\circ\text{C}$	До 2000
ZrO_2	Совместим с вольфрамом до 2100°C , с молибденом до 2150°C	Менее 2000 из-за низкого электросопротивления
BeO	Совместим с вольфрамом до 2100°C , с молибденом до 2000°C , с углеродом до 2300°C , инертен к сплавам вольфрам/рений	До 2500
ThO_2	Термодинамически более инертен к металлам, чем BeO . Совместим с танталом, вольфрамом, вольфрам/рением до 2300°C , с молибденом до 2200°C	Выше 2000
Y_2O_3	Термодинамически более инертен к металлам, чем BeO	Выше 2000
HfO_2	Слабо изучен	-
BN	Инертен	До 2500

Таблица 3.7

Минимальные погрешности для различных типов термопар

Термопара	Температура, °С	Погрешность измерения температуры, °С
ТХК (L)	0-400	± (0,1-0,2)
ТХА (K)	Более 300	± 1
	Менее 300	± (0,1-0,2)
ТПП (S)	300-1100	± (0,25-0,6)*
ТПР (B)	900-1800	± (0,8-2,0)*
BP 5/20	2000	± 8
	900-2000	± (8-30)**

*Для образцового средства первого разряда

**Для рабочего средства измерения

Положительные качества термопар ТХК(L) – высокая чувствительность (большое значение дифференциальной ТЭДС) и исключительная термоэлектрическая стабильность до температуры 600°С. Недостатки – существенное изменение ТЭДС под действием деформации, обратимая нестабильность. Обратимая нестабильность обусловлена превращениями в хромеле по типу ближнего упорядочения, происходящего при температуре 250-550⁰С. Алюмель в этом смысле более стабилен. Значение отклонения температуры, связанное с этим упорядочением, редко превышает 3⁰С для ТХА(K).

Устранить обратимую нестабильность практически невозможно, поскольку в любой работающей термопаре имеется область с упорядоченной структурой, влияние которой на показания зависит от уровня и градиента температуры, истории ее изменения во времени и др. Как правило, поля температур по длине термопары в рабочих условиях и при ее градуировке не совпадают. Поэтому лишь в случаях, когда рабочая температура не превышает 550⁰С, можно добиться стабилизации ТЭДС отжигом термоэлектродов на упорядочение при температуре (450±25)⁰С в течение 6 ч и тем самым обеспечить воспроизведение ТЭДС, полученной при градуировке, в рабочих условиях. В остальных случаях неопределенность измеряемой температуры сохраняется. Обычно градуировку рекомендуют проводить на предварительно отожженных термоэлектродах. Отжиг при температуре 800 – 850⁰С в течение 30-45 мин обеспечивает восстановление ТЭДС для сплава в состоянии разупорядочения. В стандарте ASTM E 839

предусмотрен аналогичный отжиг, но при температуре 870-1000⁰С в течение 2 мин.

Термошумовые термометры

Мощность шумового напряжения частотой ν в проводнике R при температуре T определяется уравнением Найквиста:

$$\frac{d\bar{U}^2}{d\nu} = 4hR\nu(\exp h\nu / kT - 1)^{-1},$$

где h – постоянная Планка. При $h\nu \ll kT$ $\bar{U}^2 = 4RkT\nu$.

Тепловое движение носителей заряда сопровождается флуктуациями их объемного распределения и, как следствие, появлением флуктуирующей разности потенциалов со средним значением, равным нулю.

Простота принципа преобразования температуры в мощность шума электрического напряжения вовсе не означает, что так же просто может быть реализована и схема измерения. Измерительные цепи термошумовых термометров довольно сложны и обеспечивают измерение температуры с погрешностью от 0,04⁰С (в очень узкой области температур) до 180⁰С (при 2200⁰С). Чувствительные элементы термошумовых термометров, как правило, металл и их сплавы: платина, константан, манганин, нихром. Максимальная температура применения зависит от температуры плавления материала чувствительного элемента.

Пьезоэлектрические термометры

Принцип действия термометров основан на том, что частота собственных колебаний пьезокристалла зависит от температуры. Подавая на пьезокристалл переменное напряжение от генератора, регистрируют частоту, соответствующую резонансу, по которой и определяют температуру. Пьезоэлектрический термометр состоит из резонатора, генератора и регистратора (частотомер). Наиболее распространенный материал чувствительного элемента резонатора – пьезокристаллический кварц. Резонансная частота механических колебаний кварцевого элемента равна

$$v = \frac{n}{2H} \sqrt{E_{ij} \cdot \rho^{-1}},$$

где n – номер гармоники возбуждающих колебаний (кратная H);

H – размер элемента в направлении распространения упругих колебаний;

ρ – плотность кварца;

E_{ij} – модуль упругости, различный для разных ориентаций кристалла.

Температурный коэффициент резонансной частоты в основном определяется температурной зависимостью модуля упругости. При различных ориентациях плоскостей среза пьезокристалла температурный коэффициент резонансной частоты может достигать нескольких кГц/град. Диапазон применения кварцевых термометров ограничивается температурой Кюри, а на практике диапазон измерения температуры кварцевыми термометрами находится в пределах от -80 до $+250$ °С. Погрешность измерения температуры этими термометрами мала и составляет десятые и сотые доли градуса.

Акустические термометры

Принцип действия акустических термометров основан на зависимости скорости распространения звука в среде от температуры. Акустический термометр содержит звуковод, излучатель и приемник звука. Скорость распространения звуковых колебаний в жидкой и газообразной среде, в тонком металлическом стержне равна

$$v = \sqrt{E / \rho},$$

где E – модуль упругости, зависящий от температуры;

ρ – плотность материала звуковода.

В наиболее распространенных акустических термометрах приемник регистрирует отраженные ультразвуковые колебания, генерируемые пьезоэлектрическим или магнитострикционным генератором. Применение в качестве звуководов тугоплавких металлов позволяет измерять температуру до ≈ 3000 °С.

В ультразвуковых термометрах существуют разновидности, в которых реализуются резонансные схемы.

Ёмкостные термометры

В ёмкостных термометрах для измерения температуры используется температурная зависимость ёмкости чувствительного элемента. Ёмкость может меняться либо вследствие изменения диэлектрической проницаемости материала, либо – изменения межэлектродного расстояния в конденсаторе или его площади.

В сегнетоэлектриках при температурах выше точки Кюри T_k диэлектрическая проницаемость ε зависит от температуры по соотношению:

$$\varepsilon = A/(T - T_k).$$

В качестве материалов ёмкостных термометров применяют широкий класс диэлектриков. Основная область их применения – низкие температуры. До высоких температур могут применяться некоторые ёмкостные термометры дилатоконденсаторного типа (до 1000 °С).

Индуктивные термометры

В индуктивных термометрах используется зависимость от температуры индуктивности чувствительного элемента. Обычно катушка индуктивности содержит сердечник с температурозависимой магнитной проницаемостью. Температурный коэффициент индуктивности медной обмотки на ферритовом кольце достигает 1,6% на градус (при 225 К). Термометры применяют для измерения отрицательных по шкале Цельсия температур.

Квантовые термометры

В квантовой термометрии используется температурная зависимость параметров фундаментальных физических явлений и взаимодействий на атомном и субатомном уровнях.

Зависимость частоты ядерного квадрупольного резонанса от температуры используется для создания квадрупольных ядерных термометров. Наиболее

подходящими для реализации этого принципа преобразования температуры оказались: хлорат калия (10 – 400 К) и диоксид меди (до 770 К).

Устройство термометра примерно таково: чувствительный элемент помещен в катушку возбуждения, питаемую переменной частотой от генератора. При частоте расщепления уровней имеет место поглощение энергии, приводящее к резкому уменьшению добротности катушки ($Q = \omega L/R$), что, в свою очередь, меняет параметры электрической цепи.

В квантовой термометрии используются также зависимости от температуры магнитной восприимчивости (закон Кюри – Вейса) или ядерной магнитной восприимчивости (ядерный магнитный резонанс). Как правило, эти средства разрабатываются для измерения предельно низких температур вблизи «нуля» по шкале абсолютной температуры.

3.3.2. Пирометрические методы измерения температуры

Пирометрическими методами называют методы измерения температуры по излучению тела.

Теоретические основы метода

Излучение возбужденных тепловым движением атомов и молекул характеризуется длиной волны λ , частотой ν , волновым числом K (число волн в 1 см). Достаточно условно тепловое излучение разделено по длинам волн на диапазоны: ультрафиолет (0,01 – 0,38 мкм), видимый свет (0,38 – 0,77 мкм) и инфракрасный свет (0,77 – 340 мкм).

Оптические свойства физических объектов характеризуются коэффициентами: отражения (ρ), поглощения (α) и пропускания (τ).

Соотношение между этими коэффициентами для излучения длиной волны λ в условиях теплового равновесия тела устанавливается **законом Кирхгофа**:

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Отношение плотности потока излучения $b_i(\lambda)$ к коэффициенту поглощения i -того тела – величина постоянная: $b_i(\lambda)/\alpha_i(\lambda) = b_0(\lambda)$,

где $b_0(\lambda)$ – плотность потока излучения абсолютно черного тела, т.е. тела с $\alpha_0(\lambda)=1$.

Связь плотности потока (интенсивности) излучения абсолютно черного тела с его температурой установлена в законах излучения, составляющих теоретическую основу радиационной пирометрии.

По закону излучения М. Планка:

$$b_0(\lambda, T)d\lambda = C_1 \lambda^{-5} (\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda,$$

где $C_1 = 2\pi^5 c^2 h$ и $C_2 = hc/k$, h , k – постоянные Планка и Больцмана, c – скорость света, T – температура.

Для малых значений λT (менее 3000 мкм·К) закон излучения Планка преобразуется в **закон излучения Вина:**

$$b_0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(\frac{C_2}{\lambda T}).$$

Для больших значений λT справедлив **закон излучения Рэлея – Джинса:**

$$b_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{C_2} \lambda^{-4} T.$$

Для интегральной плотности потока излучения с непрерывным спектром в бесконечном диапазоне длин волн зависимость от температуры выражается **законом Стефана – Больцмана:**

$$\int_0^{\infty} b_0(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 2\pi^5 k^4 / 15c^2 h^3$.

Плотность потока излучения зависит от длины волны. Спектр зависит от температуры. При этом длина волны, соответствующая максимальной плотности потока излучения в данном спектре, смещается (рис. 3.12) по **закону смещения Вина:**

$$\lambda_{max} T = const = 2898; \lambda_{max} - \text{в мкм}; \nu_{max} = 10^{11} \text{ Гц.}$$

Кроме λ_{max} спектр может быть охарактеризован длиной волны λ_{ν} , соответствующей центру тяжести изотермы Планка (спектр излучения при данной тем-

пературе). Величину $\lambda_{\text{ц}}$ при изменении температуры определяют по *интегральному закону смещения*:

$$\lambda_{\text{ц}}T = \text{const.}$$

Для спектров излучения абсолютно черного тела справедливо соотношение

$$\lambda_{\text{ц}}/\lambda_{\text{max}} = 1,417.$$

Методы радиационной пирометрии основаны на определении: интенсивности суммарного потока излучения (пирометрия полного излучения); интенсивности монохроматического излучения (яркостная пирометрия); спектрального распределения плотности потока излучения (спектральное отношение, цветовая пирометрия). Приборы, воспринимающие и регистрирующие излучение, - пирометры с линзовой или с волоконной оптикой и чувствительными элементами в виде термобатарей, фотоэлементов, полупроводниковых фотодиодов, пирометрических ламп.

Пирометрия полного излучения

Основа пирометрии полного излучения – закон Стефана-Больцмана. Относительная чувствительность метода теоретически не зависит от температуры:

$$\Delta E/E = 4(\Delta T/T),$$

где E – суммарное излучение.

Яркостная пирометрия

В рамках действия закона излучения Вина относительная чувствительность метода пропорциональна $(\lambda T)^{-1}$. В рамках действия закона Релея – Джинса относительная чувствительность метода не зависит от температуры. Однако абсолютная чувствительность низка из-за слабой зависимости $b_0(\lambda, T)$ от T.

Пирометрия спектрального распределения плотности потока излучения

Применение этого метода требует знания спектра излучения. Практически выполнить это невозможно, во-первых, из-за чрезвычайной трудоемкости снятия изотермы Планка, во-вторых, из-за невозможности создания идеального монохроматора, обеспечивающего необходимую разрешающую способность

по длине волны. Тем не менее, в пирометрии спектрального отношения разработано несколько практических методов, не требующих снятия изотерм излучения.

Метод спектрального отношения

В рамках действия закона излучения Вина справедливо основное уравнение метода спектрального отношения:

$$\ln R(\lambda_1, \lambda_2, T) = 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \frac{C_2}{\Lambda T},$$

где $\Lambda = \frac{c}{\nu_1 - \nu_2}$; $R(\lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{b_0(\lambda_2, T)}{b_0(\lambda_1, T)}$.

Чувствительность метода возрастает с уменьшением λ и с увеличением отношения $\eta = \lambda_2/\lambda_1$. Относительная чувствительность метода уменьшается с ростом температуры. При увеличении η чувствительность метода приближается к чувствительности яркостного метода при λ_1 .

Разновидность метода спектрального отношения – цветовой метод, в котором участок видимой части спектра нормируется таким образом, чтобы в середине интервала длин волн плотность потока излучения равнялась единице. Для большинства физических объектов – излучателей нормированный спектр может быть наложен на участок видимого спектра излучения абсолютно черного тела (тоже нормированный), и при какой-то температуре они совпадут. Эта температура для абсолютно черного тела является по определению цветовой температурой реального тела. Она как бы условно определяет цвет тела.

В области действия закона излучения Вина цветовая температура тела может быть определена по яркостным температурам, определяемым для двух длин волн излучения:

$$T_u = \frac{\lambda_1^{-1} - \lambda_2^{-1}}{\lambda_1^{-1} T_{я1}^{-1} - \lambda_2^{-1} T_{я2}^{-1}}.$$

Для области действия закона излучения Планка подобное соотношение гораздо более громоздко.

Во всех разновидностях метода спектрального отношения чувствительность падает с ростом произведения λT . Поэтому в области действия закона Рэлея – Джинса не удастся достигнуть чувствительности без детального исследования спектрального распределения излучения, т.е. необходимо максимально возможное приближение к монохроматическим методам.

Метод отношения потоков суммарного излучения

В этом методе используют интегральный закон смещения. Сравнивают суммарные потоки, прошедшие через две системы с разными характеристиками $\psi_1(\lambda)$ и $\psi_2(\lambda)$. Подбирая соответствующие функции $\psi_1(\lambda)$ и $\psi_2(\lambda)$, можно из выражения:

$$F(T) = \frac{\int_0^{\infty} \psi_1(\lambda) b(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} \psi_2(\lambda) b(\lambda, T) d\lambda},$$

получить относительно простую зависимость отношения суммарного излучения от температуры, например, $F \sim T$, $F \sim T^2$ и др.

В этом методе, как и в классическом методе спектрального отношения, не требуется знать абсолютные значения интенсивности излучения. В общем случае погрешность определения температуры в m раз меньше погрешности определения F , где m - показатель степени при T в зависимости вида $F \sim T^m$.

Метод определения двух неизвестных температур по отношению измеренных спектральных интенсивностей излучения (метод Вульфсона)

Спектральную интенсивность излучения измеряют яркостным пирометром для длин волн λ^1 и λ^{11} . Если λ^1 и λ^{11} лежат в областях действия закона излучения Вина и Рэлея – Джинса соответственно, то

$$T_1 = \frac{C_2}{\lambda^1 \ln \beta^{11}} \cdot \frac{1 - \beta^{11}}{\beta^{11}},$$

$$T_2 = \frac{C_2}{\lambda^1 \ln \beta^1} \cdot (1 - \beta^{11}),$$

где $\beta^1 = b_1(\lambda^1, T_1)/b_2(\lambda^1, T_2)$; $\beta^{11} = b_1(\lambda^{11}, T_1)/b_2(\lambda^{11}, T_2)$.

В общем случае действия закона Планка подобные уравнения трансцендентны и не имеют аналитического решения, но могут быть решены графически. Точность метода Вульфсона ниже перечисленных, но зато не требует градуировки аппаратуры.

В применении пирометрических методов измерения температуры существуют методические проблемы.

Во-первых, в природе не существует идеально монохроматического излучения и реально существующее излучение в узком диапазоне длин волн (квази-монохроматическое) характеризуют эквивалентной длиной волны. Понятие эквивалентной длины волны широко используется в визуальной пирометрии. Некорректность такого подхода может приводить к значительным погрешностям при измерении высоких температур пирометрическими системами с широкой полосой пропускания или в инфракрасном диапазоне.

Во-вторых, в отличие от абсолютно черного тела, реальные тела имеют ненулевые значения коэффициентов отражения и пропускания и для них существенно понятие коэффициента излучательной способности, являющееся синонимом коэффициента поглощения для тела, находящегося в тепловом равновесии. Спектр излучения реального тела не всегда (только в случае «серого» излучения) подобен спектру излучения абсолютно черного тела, поэтому при использовании справочных значений коэффициента излучательной способности возможны ошибки в оценке температуры излучающего реального тела, тем более, что при нагреве эта характеристика может меняться в связи с изменением состояния поверхности, структуры, состава и др. В радиационной пирометрии разработаны методы уменьшения влияния неопределенности коэффициента излучательной способности тела на точность определения температуры. При этом важно какая именно температура оценивается: суммарного излучения, частичной радиации, яркостная или цветовая.

В-третьих, излучение окружающих тел, отражающееся от объекта также искажает картину его излучения. Погрешности в этом случае могут быть значительными.

Таким образом применение пирометрических методов измерения температуры нетривиально и требует квалифицированного подхода.

3.3.3. Спектрометрические методы измерения температуры

Спектрометрические методы применяют для измерений сверхвысоких температур, характерных для «горячей» плазмы (до десятков тысяч градусов).

В спектрометрических методах либо регистрируют параметры спектра собственного излучения, либо изменение параметров (поглощение, рассеяние, скорость распространения) излучения внешнего источника, проходящего через рабочую среду.

Излучение плазмы состоит преимущественно из дискретных линий, поэтому методы радиационной пирометрии неприменимы. Кроме того, тепловое состояние плазмы характеризуется несколькими температурами: молекулярной, атомной, ионной, электронной и др. Восстановление температуры по спектру излучения возможно только когда существуют теоретические зависимости излучения и плотности ионизированных частиц от температуры. В спектрометрической термометрии широко используется водородная плазма в качестве образцового источника излучения в области длин волн 124 – 300 нм. Для нее теоретически рассчитаны таблицы интенсивности излучения в диапазоне 15000 – 30000 К. Относительная погрешность расчетов достигает нескольких процентов. Температуру плазмы можно также определять по уширению спектральных линий излучения, если эти эффекты изучены. Аналогично, для измерения температуры плазмы могут быть использованы закономерности поглощения плазмой рентгеновских, α и β -излучений.

И, наконец, для измерения температуры в закрытых потоках плазмы при 4000 – 10000 К используется эффект изменения скорости распространения ультразвуковых волн от температуры плазмы.

3.4. Измерение параметров переноса тепла

В энергетических и теплотехнических объектах наиболее важными процессами являются процессы генерации, передачи и преобразования тепловой энергии.

Методы измерения параметров тепловых процессов разнообразны и охватывают все области механики и научных исследований. Нам будет интересовать лишь часть этих методов, применяемых для целей теплотехнических исследований и измерений.

Измерение количества тепла (калориметрия)

Устройства, позволяющие определить количество тепла, называются калориметрами. Их действие основано на применении уравнений теплового баланса. В соответствии с условиями, реализуемыми при измерении, различают адиабатический, кинетический и стационарный методы калориметрии.

Изменение температуры твердого тела с источниками тепла определяется уравнением:

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = q_v - q_s \frac{S}{V},$$

где C – теплоемкость; ρ – плотность; q_v – объемная плотность энерговыделения; q_s – поверхностная плотность теплового потока; S – теплоотдающая поверхность тела; V – объем тела.

Принципиальная схема твердотельного калориметра изображена на рис.3.13.

В приведенном на этом рисунке калориметре могут быть реализованы все три режима измерения. При упрощающем предположении о теплообмене только через боковую поверхность для измерений в стационарном режиме нужно измерять разность температур: $T_4 - T_3$ или $T_3 - T_2$; в адиабатическом – температуру T_4 или T_3 ; в кинетическом нужно знать температуры T_4 (или T_3), T_2 (или T_1) и T_0 .

В *адиабатическом калориметре* ($q_s = 0$) при равномерном распределении температуры в рабочем теле детектора:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{q_v}{C\rho}.$$

Таким образом, измерение темпа нагревания рабочего тела калориметра при ступенчатом задании внутреннего энерговыделения позволяет определить его мощность (Дж/с).

В *стационарном калориметре* реализуется основное уравнение стационарной теплопроводности. Для теплопроводящей стенки калориметра в отсутствие теплообмена излучением:

$$q_s = -\lambda \text{grad}T, \text{ где поверхностная плотность теплового потока } q_s = q_v \frac{V}{S},$$

V, S – объем и поверхность теплоотвода рабочего тела калориметра.

В *кинетическом калориметре*, в котором существует обмен теплом с окружающей средой и справедливо приблизительно соотношение:

$$q_s \approx K \cdot (T - T_{\text{среды}}),$$

где K – коэффициент суммарной термической проводимости, температура тела при скачкообразном увеличении q_v ($q_v = 0$ при $\tau = 0$) растет по соотношению:

$$T(\tau) = T_{\text{среды}} + \frac{q_v V}{KS} [1 - \exp(-\frac{KS}{C\rho V} \tau)]$$

Измерение теплового потока

В устройствах для измерения плотности теплового потока используются те же, что в калориметрии, явления переноса тепла: теплопроводность, конвекция и излучение.

В простейшем случае плоской теплопроводящей стенки толщиной δ : $q_s = \lambda \Delta T / \delta$,

т.е. при известной теплопроводности материала стенки и измеренном перепаде температуры по ее толщине можно определить поверхностную плотность теплового потока q_s

Для измерения лучистых тепловых потоков небольшой интенсивности (десятки кВт/м²) применяют датчики, использующие фотоэлектрический и пироэлектрический эффекты.

Практическая реализация этих относительно простых методов определения количества тепла и плотности теплового потока не так проста по следую-

щим причинам: теплофизические свойства веществ (теплопроводность, теплоемкость, плотность) зависят от температуры; теплоизоляция никогда не бывает идеальной, что ограничивает время реализации адиабатических режимов; упрощения относительно распределения температуры в калориметре не всегда выполняются с необходимой точностью; практически всегда существуют не учитываемые источники или стоки тепла, влияющие на точность результата и др. По этим причинам обоснование достигаемой в измерениях точности всегда является особой и немаловажной проблемой.

3.5. Измерение параметров движения

Разделяя объекты на твердые конструкции и движущиеся среды можно отдельно рассматривать и их движение. Для конструкций характерно возвратное движение, механические колебания (вибрация), а для жидких и газообразных сред – направленное перемещение массы, параметрами которого являются скорость и расход.

3.5.1. Измерение параметров вибрации

Механические колебания характеризуются такими параметрами как амплитуда перемещения, частота и скорость колебаний, амплитуда ускорения.

Для простейших гармонических колебаний (не гармонические периодические колебания могут рассматриваться, как сумма гармонических колебаний) виброперемещение равно:

$$x = x_m \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где x_m – амплитуда виброперемещения;

ω – круговая частота вибрации $\omega = 2\pi f$;

f – циклическая частота вибрации;

φ_0 – начальная фаза колебаний.

Этим уравнением определяются и остальные параметры вибрации:

скорость $\frac{\partial x}{\partial t} = v = x_m \omega \cos(\omega t + \varphi_0)$;

ускорение $\frac{\partial v}{\partial t} = a = -x_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0)$.

Если известно виброускорение, то виброскорость и виброперемещение определяются интегрированием ускорения по времени. Такая последовательность вычисления параметров вибрации, во-первых, обеспечивает более высокую точность (при интегрировании, в отличие от дифференцирования, не уменьшается отношение сигнал/шум) и, во-вторых, не требует абсолютной калибровки датчика и установки «нуля».

В простейших гармонических колебаниях параметры вибрации связаны следующими соотношениями: $v_m = 2\pi f x_m$, $a_m = 4\pi^2 f^2 x_m$.

Основным законом, связывающим кинематические и динамические величины, является второй закон Ньютона: $F = ma$.

Таким образом, виброускорение может быть измерено несколькими методами: измерением силы воздействия инерциальной массы акселерометра (m) на опору или измерением амплитуды и частоты виброперемещений. В первом случае могут применяться пьезоэлектрические, тензорезистивные, магнитоупругие и основанные на эффекте Холла преобразователи. Во втором случае – преобразователи частоты и перемещения (индуктивные, реостатные, емкостные и др.).

В измерениях параметров вибрации различают измерение абсолютных и относительных вибраций. **Абсолютная вибрация** – вибрация конструкций относительно инерциальной системы, роль которой может исполнять инерциальная масса так называемого сейсмического вибродатчика. **Относительная вибрация** – вибрация конструкций относительно опоры или фундамента или другой конструкции.

Схема механического аналога вибродатчика абсолютной вибрации показана на рис.3.14.

Сейсмический датчик имеет амплитудно-частотную характеристику фильтра верхних частот второго порядка (рис. 3.15). Собственная частота сейсмического акселерометра при $M \gg m$ равна:

$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$, где k – коэффициент жесткости упругого элемента.

Резонансная частота с учетом демпфирования системы, называемая также верхней частотой резонанса, связана с собственной частотой соотношением $f_r = f_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2}$. Коэффициент демпфирования, жесткость упругого элемента вибродатчика, его инерциальная масса, а также заданная динамическая погрешность измерений определяют минимальную частоту вибрации, которую можно измерить сейсмическим вибродатчиком.

Датчики измерения виброскорости и виброускорения имеют механические схемы, аналогичные рассмотренному выше датчику виброперемещений. Для измерения виброскорости вместо преобразователей линейных перемещений применяют электродинамические преобразователи, выходной электрический сигнал которых пропорционален скорости механических колебаний.

В датчиках виброускорений, в отличие от предыдущих, желательно иметь максимально возможную частоту собственных колебаний; инерциальная масса должна быть как можно меньше, а пружина – как можно жестче. В этом случае сила инерции вызывает перемещение инерциальной массы, пропорциональное квадрату частоты вибрации, т.е. пропорционально ускорению. Это перемещение может быть измерено любым малоинерционным преобразователем малых линейных перемещений. Рабочий диапазон частот преобразователей виброускорений (акселерометров) лежит ниже частоты собственных колебаний (в отличие от преобразователя виброперемещений). В этом смысле можно говорить о том, что акселерометр имеет амплитудно-частотную характеристику фильтра нижних частот. Датчики виброускорений гораздо миниатюрнее датчиков виброперемещений: первые весят от 0,2 до 50г, вторые – от 1 до 2кг. Частота собственных колебаний вибродатчиков находится в диапазоне 0,5 – 10 кГц, а акселерометров – 0,015 – 100 кГц.

3.5.2. Измерение расхода жидких и газообразных сред

Принципы измерения расхода основаны на уравнениях гидродинамики. **Объемным расходом** называют объем жидкости или газа, протекающих через трубопровод сечением S в единицу времени. Масса этой жидкости или газа называется **массовым расходом**: $Q_V = \bar{v}S$; $Q_G = \rho\bar{v}S$ (\bar{v} - средняя скорость потока среды, ρ - ее плотность). Методы измерения расхода разнообразны.

Объемные методы измерения расхода

Различают методы прямого и косвенного измерения расхода. В методе прямого измерения применяются объемные счетчики с измерительными камерами. Важной разновидностью устройств прямого измерения объема являются так называемые мерники, применяемые обычно для аттестации расходомеров всех типов. Метод косвенного измерения расхода реализуется в турбинах, роторных и шнековых расходомерах. Рассмотрим самые распространенные из них.

Расходомеры обтекания

Турбинный расходомер

На рис.3.16. показана схема турбинного расходомера с аксиальной турбинкой. Скорость её вращения зависит от скорости течения жидкости или газа, так как сила, воздействующая на лопасти турбины, определяется динамическим напором жидкости.

Частота вращения турбинки n связана с расходом Q соотношениями:

$$\text{для осевой турбинки } n_{oc} = \frac{Q}{SH},$$

$$\text{для тангенциальной турбинки } n_{танг} = \frac{Q}{S \pi D_l},$$

где S – площадь живого сечения потока в зоне лопастей турбинки;

H – ход винтовой нарезки лопастей;

D_l – диаметр наибольшей окружности лопасти тангенциальной турбинки.

В этих соотношениях не учитываются: наличие момента инерции ротора, завихрения в потоке, неравномерное распределение скоростей по сечению потока, вязкость среды, сжимаемость, сила трения в опорах турбинки и т.п.

В турбинных расходомерах применяются счетчики оборотов, чаще всего, электромагнитные.

Турбинные расходомеры применяются также в комбинированных преобразователях массового расхода, в которых дополнительно к объемному расходу измеряется плотность жидкости.

Ротаметр

Очень распространенный прибор для измерения расхода газа в лабораторной практике. Упрощенная схема ротаметра приведена на рис.3.17.

Сила, действующая на поплавков ротаметра со стороны потока среды равна:

$$F = S_{эф} \Delta P,$$

где $S_{эф}$ – эффективная площадь приложения давления;

ΔP – перепад давления в потоке на длине поплавка.

Сила F уравнивается весом поплавка. По мере увеличения скорости потока увеличивается перепад давления ΔP и сила F . Поплавков всплывает до тех пор, пока живое сечение потока не увеличится до такого размера (из-за уменьшения средней скорости потока), что перепад ΔP восстановится и сила F вновь уравнивается весом поплавка $F = G$. Положение поплавка в коническом канале указывает на расход среды и может регистрироваться различными методами. Расходомеры такого типа относятся к расходомерам постоянного перепада давления.

Расходомеры переменного перепада давления

Расходомерами переменного перепада давления являются преобразователи расхода с сужающими устройствами. Наиболее распространены три типа сужающих устройств (рис.3.18): диафрагма, сопло и сопло Вентури.

В стационарных свободных от трения потоках сумма давления, потенциальной и кинетической энергии постоянна (уравнение Бернулли):

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = const .$$

Для сужающего устройства без учета потери энергии потока справедливо равенство:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}, \text{ откуда } P_1 - P_2 = \Delta P = \frac{\rho}{2}(v_2^2 - v_1^2).$$

Для несжимаемой жидкости справедливо соотношение неразрывности потока, выражаемое как равенство расходов жидкости в измерительном трубопроводе и сужающем устройстве:

$$q_1 = q_2 = q_0 \text{ или } v_1 \pi D^2 / 4 = v_2 \pi d^2 / 4 = q_0 \text{ (объемный расход).}$$

Обозначим $\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 = \beta^2$, тогда $\Delta P = \frac{\rho}{2} v_2^2 (1 - \beta^4)$ и $q_0 \rho = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{2 \rho \Delta P}}{\sqrt{(1 - \beta^4)}}$.

Обозначив $\frac{\pi d^2}{4} \frac{\sqrt{2 / \rho}}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} = K_{np}$ запишем уравнение преобразования расхода в су-

жающем устройстве: $q_0 = K_{np} \sqrt{\Delta P}$.

K_{np} зависит только от геометрических размеров измерительного трубопровода и сужающего устройства и от плотности жидкости. На самом деле, в измерительном трубопроводе и сужающем устройстве происходит потеря энергии потока (потери на трение), а при малых скоростях из-за вязкости среды эффективное сечение для потока отличается от геометрического сечения сужающего устройства и непостоянно из-за изменения эпюры скоростей по сечению потока. Все это сказывается на коэффициенте преобразования расхода в перепад давления и учитывается при проектировании расходомеров введением коэффициента истечения C :

$$q_0 \rho = C K_{np} \sqrt{\Delta P}.$$

При измерениях расхода сжимаемых сред в уравнение преобразования вводится поправочный коэффициент ($\varepsilon < 1$):

$$q_0 \rho = \varepsilon C K_{np} \sqrt{\Delta P}.$$

Перепад давления в расходомерах с сужающими устройствами измеряют, как правило, дифференциальными манометрами различных типов.

Расходомеры с сужающими устройствами не отличаются высокой точностью (приведенная погрешность 1-3%) и обладают довольно малым динамическим диапазоном $Q_{max}/Q_{min} \leq 3-4$.

Методы расчета стандартных сужающих устройств, в том числе, коэффициентов истечения, их типы и параметры, методы поверки нормированы межгосударственными стандартами ГОСТ Р 8.586.1,2,3,4,5 – 2005. Там же указаны способы установки сужающих устройств в рабочий участок трубопровода (в частности, диафрагмы устанавливаются острой кромкой навстречу потоку жидкости).

Корреляционный метод измерения расхода

Локальные возмущения (турбулентность, пузырьки, частицы и пр.) каких-либо параметров в турбулентном потоке могут переноситься им на некоторое расстояние практически без искажения. Регистрация этих возмущений в двух расположенных по потоку сечениях позволяет определить среднюю скорость движения жидкости. Возмущения в потоке жидкости должны фиксироваться, например, методом просвечивания жидкости ультразвуком (рис. 3.19). Неоднородности потока, попадающие на пути ультразвукового луча, меняют его амплитуду или фазу. Точно такие же изменения нужно зафиксировать во втором сечении ниже по потоку. Это будет означать, что возмущение перенесено движущимся потоком от первого ко второму сечению. Сигналы датчиков регистрируют статистические параметры потока, затем эти сигналы обрабатываются (спектральный анализ) и сравниваются в электронном устройстве, называемом **коррелятором**. Подбираемая в корреляторе величина задержки времени, обеспечивающая наилучшую корреляцию сигналов, и характеризует время доставки возмущения от первого детектора ко второму. Расстояние между детекторами и время задержки определяют среднюю скорость потока в трубопроводе.

Регистрация и обработка статистических сигналов корреляционных расходомеров представляют большую сложность, что главным образом и сдержи-

вает распространение этого метода измерения расхода в технике. К тому же этот метод относительно инерционен.

Тепловой метод измерения расхода

Метод измерения основан на эффекте охлаждения потоком помещенного в него нагреваемого тела. Из теории теплопередачи известно, что с увеличением скорости потока возрастает коэффициент теплопередачи между жидкостью и обтекаемым ею телом. Таким образом, чем больше расход, тем сильнее охлаждается тело. В качестве чувствительного элемента в тепловых расходомерах могут применяться терморезисторы (проводниковые и полупроводниковые). Сопротивление чувствительного элемента, а точнее его изменение, измеряется потенциометрической или мостовой схемой. При этом ток питания цепи не меняется. Во второй разновидности теплового метода в процессе измерений сопротивление чувствительного элемента, а значит и его температура, поддерживаются постоянными. При этом происходит регулирование напряжения питания цепи, изменение которого и служит измерительным сигналом датчика расхода.

Тепловые расходомеры относятся к измерителям массового расхода (в противоположность объемному). Коэффициент теплоотдачи в поток жидкости связан с массовым расходом соотношением: $\alpha = C_1 G^m$,

где C_1 – коэффициент, зависящий от гидравлического диаметра d_2 , динамической вязкости жидкости η , ее теплопроводности λ и критериальной зависимости $Nu = f(Re^m)$.

$Nu = \alpha d_2 / \lambda$; $Re = \rho d_2 v / \eta$, где: v - скорость потока. Показатель степени при числе Рейнольдса m в турбулентном потоке обычно равен 0,7.

С другой стороны, количество тепла, отдаваемое потоку нагревателем в единицу времени с единицы его поверхности (q_s), его избыточная температура (θ) и коэффициент теплоотдачи связаны соотношением: $q_s = \alpha \theta$.

Таким образом, статическая характеристика преобразования теплового расходомера имеет вид: $q_s / \theta = C_1 G^m$

Кроме рассмотренного выше расходомера – термоанемометра существует вторая разновидность теплового расходомера – калориметрический. В расходомерах этого типа поток нагревается электронагревателем, мощность которого W и подогрев теплоносителя Δt измеряются. Расход определяют из соотношения $G C_p \Delta t = W$.

Такие расходомеры применяют для измерения стационарного расхода жидкости, поскольку являются инерционными.

Тепловые расходомеры применяются главным образом для измерения малых (и очень малых) расходов, поскольку их чувствительность с увеличением скорости потока уменьшается.

Ультразвуковой метод измерения расхода

Принцип измерения расхода основан на эффекте переноса ультразвуковых волн движущимся потоком жидкости. Скорость распространения высокочастотных ультразвуковых колебаний (частота > 50 кГц) равна скорости звука. В потоке, движущемся по направлению распространения волны, эта скорость возрастает на величину, равную скорости движения среды. В ультразвуковых расходомерах *времетраплетного типа* на измерительном трубопроводе на некотором расстоянии по его длине устанавливаются источник и приемник ультразвуковых волн (рис.3.20).

В качестве излучателя и приемника, как правило, применяют пьезоэлектрические элементы. При одном излучателе и одном приемнике на результат измерений влияют температура и плотность жидкости. Для того чтобы исключить эти влияния, применяют двухканальные схемы измерений, в которых сигнал посылается одновременно в противоположных направлениях: по потоку и против него. В этом случае

$$\bar{v} \cos \beta = \frac{l}{2}(1/\tau_1 - 1/\tau_2),$$

т.е. влияние параметров среды на скорость звука исключено.

Разновидностью ультразвукового метода является *метод с использованием эффекта Доплера*. Упрощенно эффект Доплера заключается в том, что

регистрируемая частота излучения зависит от относительного перемещения излучателя и регистратора (при сближении она выше, а при удалении ниже). Расходомер Допплера основан на регистрации излучения, отраженного от движущихся с потоком частиц иной, чем основная среда, плотности. В зависимости от скорости удаления частиц (скорости их движения) от приемника будет меняться и регистрируемая частота отраженного излучения (при постоянной частоте источника). Тот же принцип применим и в расходомерах с лазерным источником излучения.

Серьезным достоинством ультразвуковых расходомеров является отсутствие каких-либо устройств внутри измерительного трубопровода. Типичный уровень погрешности ультразвуковых расходомеров $\pm 2\%$ (редко $\pm 1\%$) – для времяпролетных и до $\pm 5\%$ - для доплеровских..

Вихревой метод измерения расхода

Принцип действия вихревых расходомеров основан на том, что при обтекании препятствия в потоке возникают завихрения, получившие название ***вихревой дорожки Кармана***. В определенных условиях течения частота образования вихрей пропорциональна скорости потока. При цилиндрическом теле обтекания частота вихрей равна:

$$f = Sv^*/d,$$

где v^* - скорость потока вблизи тела обтекания (плохо обтекаемого тела);

d – диаметр цилиндра обтекания (при прямоугольном теле обтекания – это его ширина);

S – число Струхала $S = fd/v^*$.

В общем случае число Струхала является функцией числа Рейнольдса. Однако в широком интервале значений Re число Струхала практически постоянно (рис. 3.21).

Из условия неразрывности потока: $Q = (\pi D^2/4)v = (\pi D^2/4 - Dd)v^*$, где: v - средняя скорость потока до тела обтекания, D - диаметр трубопровода, следует:
 $f = SQ/d(\pi D^2/4 - Dd) = 4 SQ/d\pi D^2(1 - 4d/\pi D)$.

Коэффициент пропорциональности частоты отрыва вихрей от величины расхода зависит от геометрии канала и от формы тела обтекания. Последнее учитывается введением в функцию преобразования коэффициента обтекания k в виде: $(1 - 4kd/\pi D)$.

Наличие и движение в потоке вихрей означает флуктуацию параметров потока, например, его поперечной плотности, электропроводности, давления, температуры и др. Частота этих флуктуаций и является информативным параметром преобразователя расхода. Следовательно, частоту образования вихрей можно регистрировать малоинерционным терморезистором, датчиком давления, например, пьезоэлектрическим, или, что предпочтительнее, модуляцией ультразвуковых колебаний на вихрях.

Вихревые расходомеры успешно применяются в самых разных жидкостях (жидкие металлы, дистиллированная вода). Вихревые расходомеры могут обеспечить довольно высокую точность измерений (приведенная погрешность $\leq 0,5\%$), а их динамический диапазон гораздо выше, чем у расходомеров переменного перепада давления и может в принципе достигать 30.

*Магнитно-индукционный (электромагнитный, магнитогидродинамический)
метод измерения расхода*

Этот метод применим для измерения объемного расхода электропроводной жидкости. Согласно закону Фарадея, в магнитном поле в движущемся проводнике генерируется э.д.с., величина которой зависит от скорости движения проводника.

Э.д.с., возникающая при движении проводника в магнитном поле пропорциональна скорости движения v и длине проводника (в данном случае – диаметру трубопровода D) и магнитной индукции B : $U = BDv$. Объемный расход Q равен: $Q = \pi D^2 v/4$. Тогда уравнение преобразования индукционного расходомера имеет вид:

$Q = \pi D U/4B$, где U – выходное напряжение.

Схема магнитно-индукционного расходомера показана на рис.3.22.

Измерительный трубопровод в электромагнитных расходомерах должен быть выполнен из неэлектропроводного материала, а электроды должны иметь электрический контакт с жидкостью. Для снижения влияния эпюры скоростей в сечении трубопровода цилиндрический измерительный участок заменяют на прямоугольный. Электропроводность жидкости должна быть не ниже $10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Основная приведенная погрешность электромагнитных расходомеров с электромагнитным возбуждением промышленной частоты (50Гц) обычно составляет $\pm(0,5-1)\%$.

Метод динамического напора

Для измерения потока газа, особенно высокоскоростного, эффективно применение расходомера динамического напора. Чувствительный элемент расходомера представляет собой напорную трубку Прандтля (рис.3.23). Часть трубки Прандтля, воспринимающую динамический напор, называют также трубкой Пито.

Уравнение преобразования напорного расходомера, по существу, представляет собой преобразованное уравнение Бернулли:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_1)}.$$

Напорный расходомер является датчиком локального расхода. Измерение разницы $P_2 - P_1$ может быть осуществлено датчиками разности давлений любых типов.

3.6. Измерение линейных размеров

В этом разделе рассмотрим методы измерения размеров тел и линейных перемещений, деформаций и толщины.

3.6.1. Измерение линейных размеров и перемещений объектов

Оптические методы измерений

Оптические методы измерений – бесконтактные и безинерционные. Современные оптоэлектронные датчики, воспринимающие оптический сигнал, позволяют решать практически любую измерительную задачу. Почти идеальным источником излучения для оптических датчиков является лазер.

В процессе оптоэлектронного измерения объект зондируется одним или несколькими источниками. В зависимости от задачи измерения применяются способы отраженного или проходящего (трансмиссионные) светового луча. При этом для отображения объекта используются физические явления отбрасывания тени, триангуляции, отражения и дифракции.

Метод отбрасывания тени

Приборы для измерений размеров и перемещений методом отбрасывания тени содержат, как правило, фотодиоды, в которых достигается разрешение 0,3 мкм. Время измерения составляет 10^{-3} с.

В оптических датчиках перемещений используют штриховую линейку (растр), или более сложный штриховой элемент, называемый кодером (рис. 3.24).

Разрешающая способность оптоэлектронного датчика составляет $\frac{1}{4}$ периода штриховой линейки. Выпускаемые заводом «Измерон» (г. С.-Петербург) датчики позволяют производить измерения в диапазонах:

± 1 мм с дискретностью отсчета 0,1 мкм и погрешностью ± 3 мкм;

± 100 мкм с дискретностью отсчета 0,01 мкм и погрешностью $\pm 0,3$ мкм.

Скорость измеряемого перемещения может составлять 15 см/с.

Метод триангуляции

В геодезии *триангуляцией* называют метод нанесения объектов на карту путем построения смежных треугольников.

В триангуляционных датчиках применяют такие же приемники излучения. Однако в этом случае приемником регистрируется изменение положения светового пятна, обусловленное перемещением отражающей луч поверхности (рис.3.25). Погрешность метода составляет ± 1 мкм на перемещении 1 мм.

Дифракционный метод

Более высоким разрешением обладают системы с регистрацией дифракционной картины. При прохождении пучка когерентного монохроматического луча через щель за ней возникает пространственное перераспределение интенсивности света (так называемый дифракционный узор). Периодичность дифракционных полос зависит, при прочих равных условиях, от ширины щели. Дифракционную картину можно регистрировать, например, линейкой с фотодиодами (рис. 3.26). Точность приборов, использующих принцип дифракции, находится в субмикронном интервале.

Интерференционный метод

Более чувствительным, а главное, имеющим больший диапазон измерения, является метод, основанный на интерференции монохроматического излучения, отраженного от двух, соосно расположенных, поверхностей. Интерференцию можно наблюдать лишь при сложении когерентных волн, т.е. волн, частота и разность фаз которых постоянна во времени.

Схема лазерного интерферометра приведена на рис.3.27. Излучение лазера расщепляется в светоделителе и направляется на две отражающие поверхности, одна из которых подвижна. Отраженные лучи проходят светоделитель и воспринимаются приемником. До приемников лучи проходят поляризационные фильтры, смещающие полосы перед окнами фотоприемников на $\frac{1}{4}$ ширины полосы. Наличие двух приемников со сдвигом лучей по фазе на $\frac{\pi}{2}$ устраняет влияние вибраций. Интерферирующие отраженные лучи имеют разность хода, кратную полуволне излучения. При разности хода, равной четному числу полуволн, яркость луча удваивается, при нечетном – она минимальна. При перемещении объекта, с закрепленным на нем отражателем, меняется разность хода лучей, что приводит к перемещению интерференционных полос. Число прошедших полос фиксируется.

Измеряемая длина (перемещение) равна:

$$l = (N + \Delta\varphi) \lambda_0 / 2n_g = (N + \Delta\varphi) \lambda / 2,$$

где $(N + \Delta\varphi)$ – порядок интерференции, т.е. целая (N) и дробная ($\Delta\varphi$) части числа полос, прошедших перед окном фотоприемника; λ_0 – длина волны излучения лазера в вакууме; n_e – показатель преломления в воздухе; λ – длина волны излучения лазера в воздухе. Дискретность отсчетов в лазерном интерферометре равна $1/4 \lambda$. Их точность находится на субмикронном уровне. Максимальная скорость перемещения объекта не должна превосходить $0,1 \lambda/\tau$, где τ – длительность импульса лазерного излучения.

Принцип интерференции применяется также в голографическом методе определения геометрических параметров трехмерных объектов. В этом методе интерференционная картина, образуемая при облучении объекта когерентными волнами (опорная и предметная), фиксируется на голограмме. При последующем освещении голограммы опорной волной образуется трехмерное изображение объекта.

Применение полупроводниковых фотоприемников основано на явлении фотоэффекта в полупроводниковом (ПП) кристалле. Попадание кванта света в зону валентности ПП приводит к образованию пары электрон – дырка. Если энергия кванта достаточно высока, то электрон перескакивает запрещенную зону и оказывается в зоне проводимости. Электропроводность возбужденного ПП при этом значительно возрастает. Если энергии падающего кванта недостаточно, то образовавшийся в результате фотоэффекта электрон попадает в запрещенную зону, из которой возвращается в валентную зону и рекомбинирует (рис. 3.28). Таким образом, фотодиоды имеют порог fotocувствительности по энергии падающего кванта света.

Различают 6 основных структур (типов) фотодиодов: PN - 3; PIN ; Шотки; лавинный.

В PIN-структуре I-слой обладает повышенным удельным электрическим сопротивлением. Структура PIN фотодиода показана на рис. 3.29, а. Там же приведены схемы подключения датчика и вид рабочей характеристики. Поскольку при прямом подключении диода («плюс» - p-слой, «минус» - n-слой) чувствительность к фотонам очень мала (темновой ток значительно больше фо-

тонного), то фотодиоды подключают по схеме обратного смещения (рис. 3.29, б).

3.6.2. Волновые методы измерения толщины

Для измерения толщины объекта, в качестве которого могут служить покрытия и отложения на поверхности изделия, широко применяют волновые методы.

Трансмиссионный метод ионизирующего излучения

Принцип измерения заключается в том, что при прохождении через вещество коллимированный пучок уменьшает интенсивность в соответствии с характеристиками поглощения данного излучения в веществе:

$$I(k) = I_0 \exp(-\mu x),$$

где μ – коэффициент поглощения.

При известном коэффициенте поглощения толщина может быть вычислена по формуле $x = (1/\mu) \ln[I_0/I(x)]$. Обычно в качестве источников применяют радиоактивные изотопы, излучающие гамма - кванты или бета - частицы.

Метод ультразвуковой эхолокации

Принцип измерения толщины этим методом заключается в том, что время прохождения ультразвуковых волн через объект и отраженных от его обратной стороны пропорционально толщине объекта. Такие толщиномеры калибруются при помощи эталонов. Возможно измерение толщины вплоть до 300 мм.

Вихревой метод измерения толщины покрытия

Вихревой метод применяется для измерения толщины диэлектрических покрытий (отложений, окисных пленок) на электропроводном материале. Электромагнитное переменное поле катушки датчика проникает в электропроводный материал на глубину z , зависящую от частоты (ω), магнитной проницаемости (μ) и плотности материала (ρ): $z_{0,05} = \sqrt{2/(\omega\mu\rho)}$. При 500 кГц значение $z_{0,05}$ для меди и алюминия равно 0,1 мм. Приближение катушки к поверхности при-

водит к изменению ее поля и электрических параметров витка: активное сопротивление витка увеличивается из-за увеличения потерь в проводнике, а его индуктивное сопротивление уменьшается.

При прочих равных условиях изменение импеданса катушки определяется расстоянием до проводника. Если это расстояние ограничивается непроводящим покрытием или пленкой отложений, то в итоге измеряется их толщина. Вихретоковые преобразователи имеют низкую чувствительность, их показания зависят от температуры, поэтому они не применяются для измерения перемещений.

3.6.3. Контактные методы измерения линейных перемещений (деформаций)

Тензорезисторные преобразователи

Принцип измерения основан на явлении тензоэффекта, заключающегося в изменении электросопротивления проводников и полупроводников при их деформации.

Сопротивление резистора в общем виде зависит от его длины l , сечения S и удельного электрического сопротивления ρ : $R = f(l, S, \rho)$

С точностью до первой производной можно записать:

$$dR \approx \frac{\partial R}{\partial S} dS + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho;$$

$$\frac{\partial R}{R} = \frac{\partial l}{l} \left\{ \frac{l}{R} \left(\frac{\partial R}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial l} + \frac{\partial R}{\partial l} + \frac{\partial R}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} \right) \right\} = S_l^R \frac{\partial l}{l},$$

где S_l^R - коэффициент чувствительности изменения сопротивления к изменению длины резистора.

Поскольку $\frac{\partial d}{\partial l} = -\mu \frac{d}{l}$, где μ - коэффициент Пуассона, то $S_l^R = 2\mu + 1 + \text{const}$. Теоретически для цилиндра из однородного материала $\mu = 0,5$, и тогда, при $\text{const} \ll 1$ $S_l^R = 2$. На самом деле, для многих металлов $\mu \approx 0,3$, а S_l^R равен: 2,1 – 2,3 для нихрома; 2,0 – 2,1 для константана; 0,5 для манганина и 12 для никеля! Откло-

нение коэффициента от 2 означает, что в этом материале нельзя пренебречь изменением удельного электрического сопротивления от механических напряжений (пьезорезистивный эффект).

Таким образом, в проводниковых резисторах в основном относительное изменение сопротивления пропорционально их относительному удлинению.

В полупроводниковом резисторе тензорезистивные коэффициенты (продольный, поперечный, сдвиговой) зависят главным образом от удельного электросопротивления. Суммарный коэффициент тензочувствительности полупроводникового тензоэлемента в десятки и сотни раз превышает его у металлических тензорезисторов и зависит не только от материала полупроводника, но и от ориентации тензоэлемента относительно кристаллографических осей.

В технике измерений применяют проволоочные и пленочные тензорезисторы, одиночные и розеточные. Тензорезисторы либо наносятся на подложку, которая затем наклеивается (приваривается) на упругий элемент датчика, либо сразу размещаются на упругом элементе (консольная балка, мембрана и т.д.).

Современные тензорезисторы миниатюрны (размерами в несколько миллиметров) и отличаются большим быстродействием. Собственная частота достигает 10^5 Гц. В принципе, тензорезисторы могут быть использованы для измерений при относительно высокой температуре (около 1000 °С), но в предложениях мировых производителей тензоэлементов редко указываются температуры применения выше $300 - 400$ °С. Приведенная погрешность тензорезисторных датчиков деформации равна $0,2 - 0,5\%$ (при измерениях напряжений в материале эта погрешность значительно больше $2 - 10\%$). Максимальная измеряемая деформация для проводниковых тензорезисторов не превышает 2% , полупроводниковых – $0,1\%$. Наиболее серьезным влияющим фактором в тензодатчиках является температура, поскольку температурный коэффициент сопротивления, как правило, многократно превосходит значение коэффициента тензочувствительности: для нихрома, например, в 50 раз. Измерительные цепи тензодатчиков – любые известные резистивные цепи (полумост, мост, делитель) с активными плечами от 1 до 4. Полупроводниковые тензорезисторы имеют чувстви-

тельность в 100 –1000 раз больше, чем проводниковые. Однако из-за сильной нелинейности характеристики их динамический диапазон значительно меньше.

На рис. 3.30 показаны схемы размещения тензодатчиков на упругих балках и одна из возможных схем измерений.

Емкостные преобразователи

Принцип измерения ясен из уравнения для емкости плоского конденсатора (без учета краевого эффекта):

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S / \delta,$$

где C – емкость;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

S – площадь обкладки (пластины) конденсатора;

δ – толщина диэлектрической прослойки между пластинами.

Из уравнения следует, что для измерений могут быть применены два способа: изменение площади пластин, изменение зазора между пластинами (см. рис. 3.31).

В первом случае коэффициент преобразования $k=C/S$ – величина постоянная, а характеристика датчика, измеряющего линейное перемещение, линейна, если изменение площади S - линейная функция перемещения (пластины прямоугольной формы).

Во втором случае изменение емкости зависит от толщины зазора не линейно:

$$dC/d\delta = - \epsilon_0 \epsilon_r S / \delta^2.$$

При малых изменениях δ справедливо приближительное равенство: $\Delta C/C \approx -\Delta\delta/\delta$.

При относительном изменении зазора 1,0% отклонение от линейной характеристики составляет 1%, а при изменении зазора 10% и нелинейность достигает 10%. Для линеаризации функции преобразования емкостного датчика применяют дифференциальное включение конденсаторов (рис. 3.31, в).

Диапазон частот измеряемых емкостными преобразователями перемещений $0 - 10^5$ Гц. Емкостные преобразователи очень чувствительны к электрическим помехам.

Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивных преобразователей основан на том, что изменение магнитного сопротивления контура (Z_M) приводит к изменению индуктивности обмотки (L) с ферромагнитным сердечником, которое, в свою очередь, изменяет импеданс датчика, являющийся его информативным выходным параметром:

$$L = w^2 / Z_M,$$

где w – число витков обмотки.

$$Z_M = \sqrt{R_M^2 + X_M^2},$$

где R_M – активная составляющая магнитного сопротивления;

X_M – реактивная составляющая магнитного сопротивления: $X_M = P / \omega \Phi^2$, где ω – круговая частота; Φ – магнитный поток; P – потери в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи:

$$P_{гист.} = CB^x f V_c 10^3 \text{ [Вт]},$$

где f – частота [Гц]; B – магнитная индукция [Тл]; V_c – объем сердечника [м^3]; $x = 1,6$ для магнитомягких материалов; C – коэффициент, равный 0,3 – для электротехнической стали, 0,75 – для мягкого железа и 6,3 – для стального литья.

$P_{вихр. \text{ токи}} = \pi^2 d_c^2 B^2 f^2 V_c 10^7 / 16 \rho$ [Вт]. Здесь ρ – удельное электрическое сопротивление [Ом м].

$X_M = P / \omega \Phi^2 \sim P / I_1^2$, I_1 – ток возбуждения (первичной обмотки в трансформаторных датчиках).

В отсутствие поверхностного эффекта магнитное сопротивление катушки с ферромагнитным сердечником и подвижной пластиной, отделенной от сердечника зазором, равно:

$$Z_M = R_M = R_{мп} + R_z,$$

где $R_{мп}$, R_z – магнитные сопротивления магнитопровода и зазора.

Учитывая, что $R_{mn} = \frac{l_{mn}}{\mu_{mn} S_{mn}}$, а $R_z = \frac{\delta}{\mu_0 S_z}$,

$$\text{получаем: } L_{\text{экв}} = w^2 \frac{1}{\frac{l_{mn}}{\mu_{mn} S_{mn}} + \frac{\delta}{\mu_0 S_z}}.$$

Здесь: l_{mn} – длина магнитопровода;

δ – толщина зазора;

S_{mn}, S_z – площадь магнитопровода и зазора;

μ_0, μ_{mn} – магнитная проницаемость воздуха и сердечника (магнитопровода).

Из-за размагничивания сердечника магнитная проницаемость магнитопровода меньше магнитной проницаемости материала сердечника μ_m :

$\mu_{mn} = \mu_m / [1 + g(\mu_m - 1)]$, где g – коэффициент размагничивания. Для цилиндрического сердечника $g = 0,84(d_c/l_c)^{1,7}$, а при конечной длине катушки l_k :

$$g = [1 + 0,211(l_c/l_k)^{1,116}] \exp[6,855 - 8,074(l_c/d_c)^{0,1353}].$$

Так как сопротивление зазора значительно больше сопротивления потерь в магнитопроводе, можно записать примерное равенство:

$$L_{\text{экв}} \approx w^2 \mu_0 S_z / \delta.$$

В случае изменения величины зазора δ (схема а) рис. 3.32): $dL/L = -d\delta/\delta$.

В случае изменения числа витков катушки W (схема б) рис. 3.32): $dL/L = 2dW/W$.

При постоянном сопротивлении потерь изменение импеданса катушки равно:

$$\Delta \dot{Z} = j\omega \Delta L = j\omega L \frac{-\Delta\delta/\delta}{(1 + \Delta\delta/\delta)}.$$

При $\Delta\delta/\delta \ll 1$

$$\Delta \dot{Z} = j\omega L \left(-\frac{\Delta\delta}{\delta}\right) \left[1 - \frac{\Delta\delta}{\delta} + \left(\frac{\Delta\delta}{\delta}\right)^2 - \dots\right].$$

Таким образом, характеристика преобразования нелинейна. Для повышения линейности преобразования применяют дифференциальное включение идентичных катушек.

С помощью электрических методов изменение индуктивности, обуславливающее изменение импеданса, может быть измерено на уровне 0,01 – 0,1%. Этого достаточно для того, чтобы с необходимой точностью регистрировать изменение толщины зазора.

В индуктивных преобразователях главным образом используют мостовые измерительные схемы. Типичная приведенная погрешность индуктивных датчиков 0,5 – 2%.. Собственная частота – до 10^4 Гц. Влияние температуры велико из-за температурного коэффициента сопротивления и индуктивности.

Одним из эффективных методов снижения температурного влияния на чувствительность индуктивного преобразователя является оптимизация частоты напряжения питания.

Кроме индуктивных преобразователей с переменным воздушным зазором, широко распространены индуктивные преобразователи с разомкнутой магнитной цепью (рис.3.33).

Индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником может быть представлена в виде суммы:

$$L = L_0 + L_c + 2M_{o.c.},$$

где L_0 – индуктивность обмотки без сердечника;

L_c – приращение индуктивности при введении сердечника;

$M_{o.c.}$ – взаимная индуктивность катушки с сердечником и без него.

Изменение индуктивности L_c катушки при перемещении сердечника с хорошей точностью описывается соотношением:

$$L_c = L_{c \max} \exp(-mx^2),$$

где x – относительное перемещение сердечника, $x = \delta/l_0$;

l_0 – длина обмотки;

δ – перемещение сердечника;

m – эмпирический коэффициент, зависящий от частоты питания обмотки (рис. 3.34).

Дифференциальное включение двух одинаковых обмоток индуктивности увеличивает чувствительность датчика и улучшает линейность функции преобразования. Обмотки при этом включаются в смежные плечи мостовой схемы.

Взаимоиндуктивные (дифференциально-трансформаторные) преобразователи

Дифференциально-трансформаторные преобразователи (ДТП) отличаются от индуктивных наличием, кроме первичной обмотки возбуждения, двух вторичных обмоток, включенных встречно (рис.3.35). Принцип действия ДТП основан на явлении взаимной индуктивности:

$$M_{1,2} = w_1 w_2 / Z_m.$$

При питании первичной обмотки переменным напряжением переменный магнитный поток, создаваемый током возбуждения, индуцирует во вторичной обмотке ЭДС. Генерируемая на выходе вторичной обмотки ЭДС, зависит от частоты ω переменного магнитного потока вторичной обмотки от электромагнитного поля первичной $\Phi_{2,1}$ и числа витков W_2 :

$$\dot{E}_2 = -j\omega W_2 \dot{\Phi}_{2,1}$$

При некоторых допущениях (малость потоков рассеяния, близость режима работы трансформатора к режиму холостого хода и др.):

$$W_2 \cdot \dot{\Phi}_{2,1} \approx M_{2,1} \cdot \dot{I}_1.$$

где $M_{2,1}$ – взаимная индуктивность; \dot{I}_1 – намагничивающий ток.

Так как $M_{2,1} = \frac{W_1}{W_2} \cdot L_2$, то $\dot{E}_2 = -j\omega \dot{I}_1 \frac{W_1}{W_2} L_2$.

Это соотношение можно назвать уравнением преобразования индуктивности вторичной обмотки трансформатора в ЭДС, генерируемую в обмотке током возбуждения.

Для двух одинаковых дифференциально включённых вторичных обмоток можно записать:

$$\dot{E}'_2 - \dot{E}''_2 = -j\omega \frac{W_1}{W_2} (L'_2 - L''_2) \dot{I}_1$$

На рис. 3.36 приведена эквивалентная схема дифференциально-трансформаторного преобразователя линейных перемещений.

Большим достоинством ДТП является отсутствие жесткой связи сердечника с катушкой. Это расширяет возможности ДТП в дистанционных измерениях. Как и все индуктивные датчики, ДТП чувствительны к температуре. Однако в последние годы найдены эффективные способы снижения температурной чувствительности ДТП. Они основаны на подборе параметров питания и вторичной цепи, а также схемы преобразования выходного сигнала. Практически всегда улучшение одних характеристик датчика сопровождается ухудшением других. Так, большинство способов снижения температурного влияния приводит к уменьшению (иногда значительному) чувствительности. Тем не менее, применение этих способов стало возможным благодаря тому, что для современных средств электроники измерение малых сигналов не такая уж большая проблема.

На рис. 3.37 показано влияние на функцию преобразования ДТП длины сердечника и вида выходного сигнала – стандартного $(L_2' - L_2'')$ и т.н. самокомпенсированного $[(L_2' - L_2'')/(L_2' + L_2'')]$.

Преобразование выходного сигнала в форму самокомпенсированного приводит к уменьшению чувствительности, но и одновременно к снижению влияния температуры и параметров питания. На рис. 3.38 показано влияние формы выходного сигнала на температурную погрешность ДТП.

Магнитно-резистивные преобразователи

Магнитно-резистивный эффект заключается в изменении электрического сопротивления полупроводника в магнитном поле. Магнитно-резистивный преобразователь состоит из магнитно-резистивного ПП и постоянного магнита (рис. 3.39). Перемещение ПП в неоднородном магнитном поле приводит к изменению его электрического сопротивления. Это изменение может фиксироваться потенциометрическими, мостовыми и другими известными схемами для параметрических преобразователей.

Материалы упругих элементов датчиков

В тензорезисторных и некоторых типах индуктивных датчиков воздействие механической величины преобразуется в деформацию упругого элемента. Конструктивно упругие элементы (УЭ) могут быть выполнены в виде плоских и цилиндрических мембран, сильфонов, консольно закрепленных балок и скоб.

Метрологические характеристики УЭ определяются свойствами материала. Механическое напряжение σ и относительная деформация ε в области упругости зависят от модуля упругости E (Закон Гука: $\sigma = \varepsilon E$). Относительное перемещение δ связано с действующей на УЭ силой коэффициентом податливости (или жесткости). Модуль упругости не должен зависеть от температуры или, по крайней мере, меняться с ней линейно, а также от времени, нагрузки, вибраций. Материал УЭ должен обладать хорошей свариваемостью, быть технологичным.

Важная характеристика УЭ – собственная частота колебаний f_0 . В целом, для УЭ справедливо соотношение $MSf_0^2 = \text{const}$ (M – масса УЭ, S – чувствительность). Для круглой мембраны эта постоянная равна 0,043, для сжатого по оси стержня – 0,25. Собственная частота УЭ зависит от заданного прогиба δ_3 и допустимого напряжения $\sigma_{\text{доп}}$. Для мембраны $f_0\delta_3 = \sigma_{\text{доп}} / (7,8\sqrt{E\rho})$, (ρ – плотность материала), а для балки $f_0\delta_3 = \sigma_{\text{доп}} / (3\pi\sqrt{E})$. При заданном прогибе 10 мкм собственная частота УЭ из АМг6, ВТ-1, К40НХМВ, 60С2А лежит в диапазоне 50-110 кГц.

Для УЭ разработаны различные сплавы и стали: БрБ2 (бериллиевая бронза), 36НХТЮ, ШХ15 (магний – хром), 30ХГСА. В случаях, когда требуется облегченный УЭ, применяют сплавы АМг6 и ВТ-6. Модуль упругости E дисперсионно-твердеющих сплавов БрБ2 и 36НХТЮ наиболее стабилен во времени. Дисперсионно твердеющие сплавы с высокими упругими свойствами на основе никель-хром-титан-алюминий (НХТЮ) имеют модуль упругости около 200 ГПа при комнатной температуре и предел прочности при растяжении примерно

2 ГПа. Зависимости модуля упругости от температуры для некоторых материалов показаны на рис. 3.40.

Для уменьшения влияния механических нагрузок на E и уменьшения гистерезиса подбирают материалы с большим значением $\sigma_{0,2}$: ШХ15, 30ХГСА, 36НХТЮ, БрБ2. За рубежом применяют медно/бериллиевые, хромомолибденовые и хромованадиевые сплавы. В лучших металлических УЭ гистерезис достигает 0,05-0,2%. На металлических УЭ погрешность составляет не менее 0,1 – 0,5%. Существенно выше метрологические характеристики полупроводниковых УЭ. Однако последние имеют недостатки: относительно низкую радиационную и температурную стойкость, сложную технологию нанесения чувствительных элементов и герметизации УЭ в датчике, малые допустимые деформации и др. ПП применяются в емкостных, пьезоэлектрических и пьезорезистивных датчиках.

Поскольку модуль упругости зависит только от природы атомов и от их взаимного расположения, значительные изменения состава, внутренней структуры и легирование слабо влияют на его величину.

Временная нестабильность модуля упругости минимальна у дисперсионно-твердеющих сплавов, таких как БрБ2, 36НХТЮ. Зависимость модуля упругости от нагрузки проявляется при напряжении, которое выше предела текучести $\sigma_{0,2}$. Поэтому следует использовать в мембране материал с максимальным пределом текучести, тем более, что чем больше $\sigma_{0,2}$, тем как правило, меньше механический гистерезис. Следует также учитывать, что плотность материала мембраны влияет на частоту собственных колебаний, т.е. косвенно влияет на его инерционность.

Метрологические характеристики датчика с упругой мембраной зависят также от формы гофра (рис.3.41).

Таким образом, с учетом требований прочности, коррозионной стойкости, технологичности обработки, свариваемости материал мембраны индуктивного датчика с переменным воздушным зазором следует выбирать из сталей и сплавов, обладающих в том числе и магнитными свойствами. Из подобных материалов

наиболее подходящие по комплексу свойств (коррозионная стойкость, высокие значения σ_B , $\sigma_{0,2}$, E) хромистые стали 30X13, 40X13.

Ферромагнитные сердечники

В индуктивных и взаимоиндуктивных датчиках важным элементом, влияющим на МХ, является ферромагнитный сердечник. Зависимость магнитной проницаемости сердечника от температуры влияет на температурную погрешность чувствительности. При нагревании ферромагнитных тел их магнитные свойства изменяются – уменьшаются магнитная восприимчивость и проницаемость. При температуре выше ферромагнитной точки Кюри (Θ_K) тело приобретает свойства парамагнетика. Намагниченность насыщения зависит от относительной температуры одинаково для всех ферромагнитных тел. При температуре $0,5 \Theta_K$ намагниченность насыщения уменьшается примерно на 10% (рис. 3.42).

Магнитная проницаемость, как и потери на гистерезис, относятся к структурно-чувствительным свойствам и существенно зависят от примесей, состава, структуры и термообработки материала.

Намагниченность материала (M) определяется напряженностью магнитного поля (H) и магнитной восприимчивостью (χ): $M = \chi H$. Магнитная индукция намагничиваемых сред

$B = \mu_0(H + M)$. У ферромагнетиков наблюдается спонтанная намагниченность. Парамагнетики ($\chi > 0$) усиливают магнитное поле. Диамагнетики ($\chi < 0$) - ослабляют. Вид кривой намагничивания ферромагнетика приведен на рис. 3.43.

Нелинейная зависимость B от H означает, что магнитная проницаемость зависит от магнитной индукции. Поэтому для каждого значения напряженности вводится понятие дифференциальной магнитной проницаемости: $\mu_{диф} \sim dB/H$.

3.6.4. Измерение уровня

Для энергетических объектов характерно измерение уровня жидких сред. Рассмотрим кратко применяемые для этих целей методы и средства. Все разнообразие уровнемеров можно разделить на две группы:

- уровнемеры с устройствами (чувствительные элементы), помещаемыми в сосуд;
- уровнемеры бесконтактные.

В уровнемерах первой группы используют различные принципы измерений:

- перемещение поплавка одновременно с изменением уровня жидкости;
- изменение гидростатического давления, воздействующего на размещенный в сосуде чувствительный к давлению элемент, при изменении уровня жидкости;
- изменение толщины (высоты) слоя жидкости в чувствительном элементе при изменении уровня.

Преобразование уровня в электрический сигнал в уровнемерах этой группы может осуществляться множеством способов: потенциометрическими, индуктивными, емкостными, кондуктометрическими датчиками, дифференциальными манометрами и др. На рис.3.44 приведены некоторые схемы измерения уровня жидкости.

В поплавковых уровнемерах изменение уровня жидкости преобразуется в перемещение штока и, далее, в преобразователе линейного перемещения – в электрический сигнал. В гидростатических уровнемерах дифференциальный манометр (в качестве которого может служить датчик дифференциального давления, помещенный внутрь сосуда) измеряет перепад давлений в рабочем и контрольном (с неизменным уровнем) сосудах: $\Delta P = mg(h_0 - h)$. В пневматических уровнемерах давление газа, поступающего через дроссель в измерительную трубку, не меняется, когда достигает величины гидростатического давления на ее срезе и пропорционально ему.

В бесконтактных уровнемерах используются явления:

- отражение излучения от поверхности жидкости;
- поглощение излучения жидкостью.

На отражении излучения основаны методы эхолокации: микроволновый (отражение от поверхности жидкости) и ультразвуковой (отражение от границы раздела жидкость-воздух). В этих методах измеряется время прохождения излучения от источника к приемнику.

На поглощении излучения основаны трансмиссионные методы: ионизирующего (главным образом гамма) излучения и ультразвуковой. Этими методами обычно либо контролируется заполнение до заданного уровня, либо дискретно измеряется несколько значений уровня жидкости в сосуде.

3.7. Измерение усилий и давления

3.7.1. Методы измерения силы и напряжения

Сила, как правило, измеряется по деформации упругого чувствительного элемента. Некоторые распространенные механические преобразователи силы в деформации приведены на рис.3.45.

Деформация (упругая) механических элементов, воспринимающих силу, измеряется тензорезисторными, пьезоэлектрическими, магнитоупругими и индуктивными преобразователями. Датчики для измерения силы будем для краткости называть динамометрами.

Тензорезисторные динамометры очень распространены в различных областях техники. Для каждого механического элемента выбираются места размещения (наклеивание, приварка) тензорезисторов, где обеспечена максимальная чувствительность и линейность. Чаще всего тензорезисторы включаются как активные плечи мостовой схемы (как правило, все четыре). Приведенная погрешность тензорезисторных динамометров находится в пределах 0,03 – 2%. Во многом класс точности динамометра зависит от точности нагрузочного устройства.

Индуктивные динамометры конструктивно отличаются от тензорезисторных, поскольку для применения индуктивных преобразователей линейных перемещений необходимо соосное перемещение упругого элемента и других час-

тей динамометра друг относительно друга. В таких датчиках применяют жесткий упругий элемент, например, пружину, возвращающую шток и соединенный с ним сердечник в исходное положение после снятия нагрузки. Приведенная погрешность индуктивных динамометров, выпускаемых для технических измерений, составляет 0,2 – 1%. В отличие от тензорезисторных, в индуктивных динамометрах практически отсутствует поперечная чувствительность.

Пьезоэлектрические преобразователи

В кристаллических диэлектриках существует упорядоченное расположение разнозаряженных ионов с осевой или плоскостной симметрией. При приложении к кристаллу силы в направлении оси чередования положительных и отрицательных ионов кристаллическая решетка деформируется, расстояние между ионами изменяется и кристалл в этом направлении электризуется. На его гранях, перпендикулярных направлению приложения силы, образуется нескомпенсированный заряд, пропорциональный силе. Коэффициент пропорциональности называется пьезоэлектрическим модулем, зависящим от ориентации кристалла. Эффект электризации кристалла под действием механических сил называется прямым пьезоэффектом. Обратным называется эффект деформирования кристалла под действием электрического напряжения. Часто пьезоэлектрики – это окислы, и наиболее популярный из них – диоксид кремния (кварц). Но пьезоэлектрическими свойствами обладают и более сложные соединения, например, титанат бария BaTiO_3 , пьезоэлектрический модуль которого примерно в 20 раз больше, чем у SiO_2 . Однако максимальная температура применения SiO_2 равна $500\text{ }^\circ\text{C}$ (точка Кюри $573\text{ }^\circ\text{C}$), а титаната бария – $100\text{ }^\circ\text{C}$ (точка Кюри $115\text{ }^\circ\text{C}$). Выходной величиной пьезопреобразователя является напряжение E между электродами $E = q/C$ (q – пьезоэлектрический заряд, C – емкость пьезокристалла). Поскольку $q = dF$ (F – сила, d – пьезомодуль), уравнение преобразования пьезокристаллического преобразователя выглядит следующим образом:

$$E = dF/C.$$

В плоской пластине $C = \epsilon_0 \epsilon_r S / \delta$ (S – площадь, δ – расстояние между электродами) и тогда:

$$E = d\delta F / \epsilon_0 \epsilon_r S.$$

Образующийся на электродах пьезодатчика заряд довольно быстро стекает, поэтому пьезоэлектрические преобразователи пригодны для измерений переменных (нестационарных) сил.

Пьезодатчик является генераторным (источник э.д.с.) преобразователем и его выходной сигнал может быть измерен вольтметром или усилителем переменного тока с большим входным сопротивлением (не менее 10^{11} Ом). Максимальная частота переменной силы ограничена собственной (резонансной) частотой. Типичная для пьезодинамометров приведенная погрешность составляет 1%.

Выходным сигналом пьезодатчика может быть собственная частота кварцевого генератора. Механическое напряжение влияет на резонансную частоту кварцевого кристалла:

$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{c / \rho}$, где: n – номер гармоники; l – толщина пластины или длина стержня; c – коэффициент упругой деформации (коэффициент жесткости, модуль Юнга); ρ – плотность кристалла.

Внешние силы приводят к изменению частоты: $f_n - f_0 = FnKf_0^2/l$. Здесь K – константа.

Измерение силы с помощью пьезорезонатора требует поиска компромисса между необходимостью повышения его добротности, с одной стороны, и увеличением жесткости – с другой.

Пьезорезистивные преобразователи

Принцип действия пьезорезистивных преобразователей основан на эффекте влияния механического напряжения на удельное электрическое сопротивление полупроводника. На воспринимающих усилие упругих кремниевых мембранах методами термовакuumного распыления или ионной имплантации

образуются пьезорезистивные элементы, которые подключаются к схемам параметрических преобразователей, например, к мосту Уитстона. Электрический сигнал таких преобразователей довольно слабый и потому требует усиления. Относительное изменение сопротивления определяется пьезорезистивным коэффициентом для данного кристаллографического направления и величиной приложенного механического напряжения.

В полумостовой схеме подключения двух резисторов (рис. 3.46) выходной сигнал равен:

$$U_{\text{вых}} = 0,25E\pi(\sigma_{1y} - \sigma_{1x}),$$

где π – коэффициент тензочувствительности кремниевой квадратной диафрагмы; E – напряжение питания.

Кремний – особый материал для различного типа преобразователей. Он применяется в датчиках, основанных на эффектах: фотоэлектрического, поскольку пропускает свет в ИК диапазоне; пьезоэлектрического; пьезорезистивного; магнитоэлектрического; магниторезистивного; ионной чувствительности; термоэлектрического (Зеебека), а также эффекта Холла.

Свойства кремния сильно зависят от кристаллической структуры и уровня легирования, следовательно могут управляемо изменяться в широких пределах (рис. 3.47).

Магнитоупругие преобразователи

Принцип действия магнитоупругого преобразователя основан на магнитоупругом эффекте. В ферромагнитных веществах доменная структура разупорядочена, а их суммарный магнитный момент равен нулю. В магнитном поле происходит ориентация доменов в направлении магнитных линий. Ориентация доменов приводит к увеличению магнитной индукции в ферромагнетике. Под воздействием внешней механической силы ферромагнетик деформируется, ориентация доменов несколько меняется, меняется и индукция. Поскольку абсолютная магнитная проницаемость вещества μ_a зависит от индукции B и на-

пряженности магнитного поля H ($\mu_a = B/H$), то изменение индукции эквивалентно изменению магнитной проницаемости. В свою очередь, от магнитной проницаемости сердечника зависит магнитное сопротивление магнитопровода длиной l и сечением S и индуктивность катушки с числом витков W : $L = W^2 \mu_a \frac{S}{l}$.

Относительное изменение магнитной проницаемости примерно пропорционально (при небольших механических напряжениях) напряжению σ . Откуда:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \mu_a}{\mu_a} \approx k \sigma.$$

Это соотношение является функцией преобразования механической силы (напряжения) в индуктивность катушки индуктивного датчика.

Магнитоупругие индуктивные, в том числе и трансформаторные, датчики включаются в мостовые измерительные цепи.

Магнитоупругие динамометры обычно применяются для не очень точных технических измерений (приведенная погрешность таких датчиков составляет несколько процентов). Их характеристики нелинейны, им присущ гистерезис (более 1%), изменение магнитной проницаемости вследствие старения ферромагнетика, а также заметное влияние температуры.

3.7.2. Методы измерения давления

Давление – макроскопический физический параметр, равный силе, действующей на единицу площади стенок сосуда.

Давление может быть измерено путем измерения силы (напряжения), воздействующей на упругую стенку или путем измерения деформации упругого элемента, воспринимающего давление. Поэтому чувствительные элементы механического преобразования давления могут быть такими же, как и механического преобразования силы (рис.3.48).

Для преобразования давления в электрический сигнал применяются реостатные, тензорезисторные (проводниковые и полупроводниковые), емкостные, пьезоэлектрические (переменное давление), индуктивные преобразователи. Манометры различают: абсолютного, избыточного давления и разницы давлений (дифференциальные манометры).

Для реостатных датчиков давления при потенциометрической схеме измерения характерны: линейность функции преобразования и гистерезис $\pm(0,1-1)\%$; постоянная времени 15-100 мс.

Тензорезисторные манометры с наклеиваемыми пленочными тензорезисторами имеют приведенную погрешность 0,5-2%. Частота измеряемых переменных давлений 1-100 кГц и более.

Невысокая чувствительность, ползучесть клеевого слоя и его старение – недостатки наклеиваемых тензорезисторов. Лучшими характеристиками обладают тензодатчики с резистивными элементами, нанесенными непосредственно на поверхность упругого элемента. Поверхность изолируют напылением SiO_2 или Al_2O_3 (толщина слоя 10 мкм). На эту подложку осаждается проводящая пленка толщиной 0,5 мкм и менее.

Существуют технологии нанесения на поверхность упругого элемента полупроводниковых тензорезисторов методом окраски. Наиболее стабильны тонкопленочные металлические тензорезисторы. Характеристики тензодатчиков в виде нанесенных слоев: линейность и гистерезис $\pm(0,2-0,5)\%$; приведенная погрешность $\pm(0,1-0,5)\%$; частотный диапазон 1-100 кГц.

Более современные технологии применяются при изготовлении полупроводниковых тензорезисторов на диэлектрической подложке. В известных датчиках давления типа САПФИР тензопреобразователь выполнен из монокристаллической сапфировой пластины, на которую методом интегральной технологии нанесена гетероэпитаксиальная пленка кремния, выполняющего роль тензорезистора. Чувствительность таких манометров очень высока, приведенная погрешность – менее 0,5%, частотный диапазон 0,05-1МГц. Однако динамический диапазон невелик, а влияние повышенной температуры существенно.

Пьезоэлектрические манометры используются для измерения импульсных или быстропеременных давлений. Достоинства пьезодатчиков: миниатюрность (линейный размер - несколько миллиметров), большой динамический диапазон (100), быстродействие, высокое разрешение (0,001%), малый гистерезис ($< 0,0001\%$). В датчиках этого типа предъявляются высокие требования к

сопротивлению изоляции ($\geq 10^{10}$ Ом), что ограничивает область их применения в промышленности.

Пьезоэлектрические датчики давления применяются также в схемах с усилением напряжения и усиления заряда (рис. 3.49).

Емкостные манометры с упругими элементами в виде мембран применяются для измерения давления жидкости и газов. Известны также пленочные емкостные датчики давления, применяемые в аэродинамических исследованиях. Типичные характеристики емкостных датчиков давления: линейность 0,5-2%, гистерезис $\leq 0,02\%$, разрешение $\leq 0,1\%$, приведенная погрешность $\pm(0,2-0,5)\%$, диапазон измеряемых частот – до 200 кГц.

Индуктивные и взаимоиндуктивные преобразователи могут использоваться почти со всеми элементами механического преобразования, показанными на рис.3.48.

Типичные характеристики индуктивных датчиков давления: линейность 0,5-3%, гистерезис 0,1-1%, разрешение 0,01%, приведенная погрешность $\pm(0,5-2)\%$, измеряемые частоты ≤ 10 кГц.

Во взаимоиндуктивных датчиках давления эти характеристики таковы: линейность 0,5-1%, гистерезис $< 0,05\%$, разрешение 0,001%, измеряемые частоты ≤ 250 кГц.

3.7.3. Методы измерения вакуума

В лабораторной практике и во многих отраслях техники важным измеряемым параметром является разрежение – давление ниже атмосферного. При низких и очень низких абсолютных давлениях могут быть неприменимы методы измерения давления как макромеханического параметра. В сильно разреженных газах имеют место кинетические явления, связанные с тем, что длина свободного пробега атома газа становится сравнима с размерами сосуда, с процессами абсорбции атомов газа на поверхности сосуда, с неполнотой обмена энергией при столкновении атома газа со стенкой сосуда и др.

Области разрежения делят на несколько групп:

- первичный вакуум (форвакуум) – $10^2 - 10^5$ Па;
- промежуточный – $10^{-1} - 10^2$ Па;
- высокий – $10^{-5} - 10^{-1}$ Па;
- сверхвысокий $< 10^{-5}$ Па.

В соответствии с областями вакуума существуют и группы вакууметров, предназначенные для измерений в данной области вакуума. Типы вакууметров приведены в табл.3.8.

Таблица 3.8

Области вакуума

Вакуум, Па	Тип датчика	Принцип преобразования давления
$10^2 - 10^5$	С трубкой Бурдона	Деформация упругого элемента
$10^{-2} - 10^5$	Емкостной с мембраной	
$10^{-1} - 10^5$	Полупроводниковый тензорезисторный с мембраной	
$10^{-2} - 10^4$	С нитью накала (измерение сопротивления нити)	Охлаждение нити накала зависит от теплопроводности разреженного газа, меняющейся с его плотностью.
$10^{-2} - 10^2$	Термопарный (измерение температуры нити накала)	
$10^{-5} - 10^{-1}$	С холодным катодом	Ионизация разреженного газа и соби- рание ионов электродом.
$10^{-5} - 10^2$	С горячим катодом (нормальный триод)	
$10^{-8} - 10^{-1}$	С горячим катодом (триод Байярда)	
$10^{-2} - 10^3$	С радиоактивным источником	

3.8. Измерение характеристик магнитных, электрических и электромагнитных излучений (ЭМИ)

3.8.1. Основные характеристики и классификация ЭМИ

Электромагнитные колебания (как волновой процесс) характеризуются:

- периодом T – наименьшим промежутком времени, по истечении которого повторяются характеристики периодического процесса;
- частотой f – числом полных колебаний за единицу времени;
- длиной волны λ – расстоянием, на которое перемещается фронт волны за время, равное периоду;
- скоростью v – частным от деления длины волны на период.

Соотношения, связывающие указанные характеристики: $f = 1/T$; $v = \lambda/T$.

Круговая частота $\omega = 2\pi f$.

Частота ЭМП имеет размерность колебание в секунду, Герц (Гц), а круговая частота – радиан в секунду.

ЭМП с частотой, равной нулю, называется статическим (электростатическим и магнитостатическим). По диапазону частот условно установлены три шкалы электромагнитных излучений (ЭМИ):

- радиотехническая (Международный комитет по радиосвязи, МККР);
- медицинская (Всемирная организация здравоохранения, ВОЗ);
- электротехническая (Международная электротехническая комиссия, МЭК).

Электротехническая шкала разбита на несколько частотных диапазонов:

- низкие частоты (НЧ) от 0 до 60Гц;
- средние частоты (СЧ) от 60Гц до 10кГц;
- высокие частоты (ВЧ) от 10кГц до 300МГц;
- сверхвысокие частоты (СВЧ) от 300МГц до 300ГГц.

Классификация ЭМИ МЭК и МСЭ (международный союз электросвязи) несколько иная:

- очень низкие частоты (ОНЧ) от 3 до 30 кГц (10 – 100 км);
- низкие частоты (НЧ) от 30 до 300 кГц (1 – 10 км);
- средние частоты (СЧ) от 0,3 до 3 МГц (100 – 1000 м);
- высокие частоты (ВЧ) от 3 до 30 МГц (10 – 100 м);
- очень высокие частоты (ОВЧ) от 30 до 300 МГц (1 – 10 м);
- ультравысокие частоты (УВЧ) от 0,3 до 3 ГГц (10 – 100 см);
- сверхвысокие частоты (СВЧ) от 3 до 30 ГГц (1 – 10 см);
- крайне высокие частоты (КВЧ) от 30 до 300 ГГц (1 – 10 мм);
- от 300 до 3000 ГГц (0,1 – 1 мм).

Скорость распространения электромагнитной волны определяется свойствами среды: абсолютной диэлектрической проницаемостью ϵ и абсолютной магнитной проницаемостью μ : $v = (\epsilon \mu)^{-1/2}$. В вакууме $\epsilon = \epsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$ Ф/м – электрическая постоянная, $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, а скорость распространения волны равна скорости света в вакууме $v_0 = c = 2,99810^8$ м/с.

Для электромагнитного поля (ЭМП) различают ближнюю и дальнюю зоны действия. Граница этих зон определяется формированием электромагнитной волны: в ближней зоне волна ещё не сформирована (зона индукции), в дальней – сформирована (зона излучения). Радиус границы двух зон ЭМП точечного источника определяется по соотношениям:

- для ненаправленных излучателей и антенн $R=\lambda/2\pi$;
- для направленных апертурных антенн $R=d^2/2\lambda$ (d - диаметр антенны);
- для других типов антенн $R=L_1L_2/2\lambda$ (L_1 и L_2 - размеры антенны).

Интенсивность ЭМП характеризуется напряжённостью электрического поля E , измеряемой в Вольтах на метр (В/м) и напряжённостью магнитного поля H , измеряемой в Амперах на метр (А/м), либо магнитной индукцией B , измеряемой в Теслах (Тл) и электрической индукцией D , измеряемая в Кулонах на квадратный метр (К/м²). Для поля в вакууме справедливы соотношения $B = \mu_0 H$, $D = \varepsilon_0 E$.

В воздухе, в дальней зоне действия, $E/H = Z_0$, где Z_0 - волновое сопротивление свободного пространства, равное 377 Ом.

При частоте ЭМИ больше 300 МГц интенсивность ЭМП характеризуется плотностью потока энергии S , выражаемой в Ваттах на квадратный метр (Вт/м²). Для дальней зоны действия $S = E^2/Z_0 = Z_0 H^2$.

Электростатика основана на законе Кулона о взаимодействии точечных зарядов. описание переменных электромагнитных полей основано на уравнениях Максвелла. Первое уравнение Максвелла устанавливает связь пространственных изменений магнитного поля с временными изменениями электрического поля:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \left(\vec{j} + \frac{\varepsilon}{4\pi} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \frac{4\pi}{c} (I + I_{cm})$$

Второе уравнение называют Законом полного тока, где I – ток проводимости; I_{cm} – ток смещения.

Второе уравнение Максвелла устанавливает связь пространственных изменений электрического поля с временными изменениями магнитного поля:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \int_S \frac{\partial B}{\partial t} d\vec{S}$$

Второе уравнение Максвелла называют также Законом электромагнитной индукции.

Источком электрического поля является электрический заряд. Магнитное поле не имеет истока, поскольку свободного магнитного заряда не существует.

3.8.2. Источники ЭМП

Естественные (природные) источники ЭМП

Электрическое поле Земли. Вектор напряжённости ЭП Земли направлен нормально к земной поверхности. У поверхности Земли $E = - (120 - 250) \text{В/м}$, в верхних слоях атмосферы – уменьшается до нуля. Существуют сезонные и суточные колебания электрического поля. Колебания напряжённости электрического поля в атмосфере определяются её грозовой активностью.

Магнитное поле Земли. МП Земли имеет сложную форму и в каждой точке характеризуется двумя составляющими: горизонтальной и вертикальной. Горизонтальная составляющая максимальна у экватора, где она достигает значе- ний 20 – 30А/м, и минимальна у полюсов, где равна 2 – 10А/м. Вертикальная составляющая МП максимальна у полюсов (60А/м) и практически равна нулю у экватора. Неоднородности МП Земли связаны с наличием зон магнитных аномалий. Диапазон частот МП Земли лежит в пределах от сотен Гц до десятков МГц.

Наэлектризованный трением (в основном искусственных тканей) человек создаёт вблизи себя ЭП напряжённостью до 10кВ/м.

ЭМП космического происхождения значительно менее интенсивны и имеют частоты от десятков МГц до десятков ГГц.

Источники ЭМП искусственного происхождения

Электромагнитные и магнитные поля техногенного происхождения воздействуют на человека как на рабочем месте, так и в быту. Источниками излучений являются электросети и подключенные (работающие) электропотребители разного назначения, технические средства, являющиеся генераторами излучений, (например, средства мобильной связи), а также намагниченные материалы и изделия.

ЭМИ техногенного происхождения многомодально и имеет широкий частотный диапазон

- 50 – 1000 Гц (до 20-й гармоники 50 Гц) от систем электроснабжения;
- 1 – 32 МГц от коротковолнового радиовещания;
- 66 – 1900 МГц (и более) - телевидение и радиовещание, радиотелефоны, средства мобильной радиосвязи, радиорелейные линии;
- 2,5 ГГц от микроволновых печей.

Источниками магнитного фона промышленной частоты являются токи промышленной частоты 50 Гц, текущие в воздушных линиях, кабелях электропитания зданий и сооружений, силовых распределительных щитках и трансформаторах. Любой линейный проводник с током создаёт вокруг себя магнитное поле. Однако при наличии контуров с током, образуемых, как правило, пространственным разнесением фазового и нулевого проводников, магнитное поле многократно усиливается.

Интенсивность ЭМП от воздушных линий зависит от их рабочего напряжения. На маршрутах обхода высоковольтных линий $E = 5\text{--}30\text{ кВ/м}$, $H = 2\text{--}10\text{ А/м}$. В жилых зданиях вблизи высоковольтных ЛЭП $E = 200\text{--}300\text{ В/м}$, $H = 0,2\text{--}2,0\text{ А/м}$ ($B = 0,25\text{--}2,5\text{ мкТл}$). Вблизи линейных проводников сети 220 В $E = 0,7\text{--}2\text{ кВ/м}$.

Источниками ВЧ и СВЧ полей являются радиопередающие устройства, средства мобильной связи, микроволновые печи. Неисправная СВЧ – печь может создавать вблизи корпуса плотность потока энергии до 100Вт/см^2 (при частоте 2,5ГГц). Частоты излучения передающих станций мобильной связи в самых распространённых стандартах сотовой радиосвязи находятся в диапазоне 450 – 1900МГц.

3.8.3. Методы и средства контроля МП

Характеристиками интенсивности магнитного поля (МП), как уже отмечалось, являются: напряжённость МП H [А/м] и индуктивность МП B [Тл].

Методы измерений МП основаны на различных физических эффектах: силовое взаимодействие МП с магнитным моментом тела или частиц вещества, возбуждение ЭДС индукции в катушке индуктивности в переменном МП, изменение траектории движущихся в МП электрических зарядов под воздействием отклоняющей силы, прецессия ядер с ненулевым спином в МП, переход вещества в сверхпроводящее состояние и обратно.

ЭДС индукции, возбуждаемая в катушке индуктивности, зависит от скорости изменения индуктивности МП: $U = W \cdot S(dB/dt)$, где W - число витков, S - площадь катушки. ЭДС индукции может возбуждаться как в переменном магнитном поле, так и в постоянном – при вращении в нём катушки. Датчики, основанные на этом эффекте, называются индукционными.

Преобразователи, основанные на эффекте ЯМР

ЯМР – резонансное поглощение электромагнитной энергии веществом, содержащим ядра с ненулевым спином во внешнем МН, обусловленное переориентацией магнитных моментов ядер. Магнитным моментом обладают все ядра кроме чётно-чётных. Магнитный момент ядра квантован и определяется спиновым квантовым числом ядра I и может принимать $2I + 1$ значений. Ядро, имеющее два состояния, представляет собой магнитный диполь. В отсутствии внешнего МП все состояния имеют одинаковую энергию, т.е. являются вырож-

денными. Внешнее МП расщепляет вырожденные состояния по энергии электронных уровней. Возникающая при этом разность энергий спиновых состояний пропорциональна магнитной индукции МП и магнитному моменту ядра по направлению напряженности МП.

Ядра элементов, обладающие магнитным моментом, прецессируют в постоянном магнитном поле вокруг направления напряженности МП. Частота прецессии пропорциональна напряжённости МП. Для обнаружения прецессии магнитных диполей диамагнитное вещество помещают в катушку индуктивности, которая включена в контур генератора высокой частоты. При плавном изменении частоты генератора наступает момент совпадения её с частотой прецессии ядер. Наступает явление резонанса. Это явление называется ядерным магнитным резонансом. Происходящее при этом поглощение энергии МП ядрами вещества приводит к резкому уменьшению добротности катушки индуктивности, уменьшению эквивалентного сопротивления контура генератора. Вследствие этого падает амплитуда генерируемого переменного напряжения, детектируемая и преобразуемая в сигнал переменного тока (сигнал ЯМР). По частоте генератора, соответствующей явлению резонанса f_p , определяют магнитную индукцию поля: $B = C \cdot f_p$, где C – постоянная датчика. Вещества, которые применяют в таких датчиках, и соответствующие им диапазоны измерений приведены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Вещества, применяемые в датчиках ЯМР (прибор Ш1-1)

Вещество датчика	Диапазон измеряемой магнитной индукции, мТл	Постоянная датчика ЯМР C , мТл/МГц
Водород (протоны)	25 - 700	23
Дейтерий	1000 - 2500	150
Литий	700 - 1000	60

В датчике имеется емкость (например, стеклянная) с диамагнитным веществом, помещенная в полость высокочастотной катушки генераторной цепи,

которая, в свою очередь, помещена в полость модуляционной катушки (рис. 3.50 а). Общий корпус датчика выполнен из латуни.

Вблизи резонанса на осциллографе прибора появляется специфическая форма сигнала (рис. 3.50 б). В режиме «модуляция» уменьшают ток в модуляционной катушке для сближения пиков и максимально возможного совмещения двух резонансных осциллограмм. После этого определяют резонансную частоту.

Датчики ЯМР обладают высокой точностью (погрешность менее 0,02%), но имеют недостаток, обусловленный тем, что ЯМР имеет место в узком диапазоне частот, его величина резко уменьшается с отклонением частоты от резонансной, с увеличением неравномерности МП и уменьшением отношения сигнал/шум. Для уверенной регистрации ЯМР с указанной погрешностью необходимо, чтобы неравномерность МП не превышала 0,02% на сантиметр, а отношение сигнал/шум было больше 5. Эти требования трудно выполнимы и сдерживают применение метода ЯМР в практических измерениях.

Преобразователи, основанные на эффекте Холла

Движущиеся в магнитном поле электрические заряды под воздействием силы Лоренца изменяют свою траекторию. Проявляется это в эффекте Холла, заключающемся в том, что при помещении в МП пластины, через которую течёт электрический ток, в направлении, перпендикулярном направлению электрического тока, на сторонах пластины возникает электрическое напряжение. Величина этого напряжения пропорциональна плотности электрического тока и напряжённости МП. На измерении этой ЭДС основан принцип работы так называемых датчиков Холла. Схема, поясняющая эффект возникновения ЭДС Холла, и эквивалентная электрическая схема датчика Холла приведены на рис. 3.51.

Благодаря развитию микроэлектроники и полупроводниковой техники очень привлекательным оказывается использование полупроводниковых (ПП) датчиков Холла. Промышленностью выпускается широкая номенклатура дат-

чиков для измерения индуктивности МП от долей мкТл до единиц Тл. Напряжение питания датчиков Холла - постоянное, от 4,5 до 10,5В. Ток питания высокоомных ПП достигает десятков мА, а низкоомных – сотен мА.

Характеристика преобразования датчиков Холла линейна (как правило, в пределах 1%) практически во всём диапазоне измерений и имеет вид, показанный на рис. 3.52. Чувствительность датчиков Холла с высокоомным ПП достигает сотен мВ/Тл, а с низкоомным ПП – единиц В/Тл.

Величина ЭДС Холла определяется соотношением: $U_x = K \cdot I \cdot B$, где K – коэффициент, зависящий от материала ПП и его размеров.

Из приведённого соотношения следует, что измеряемый милливольтметром сигнал пропорционален магнитной индукции МП и плотности электрического тока, протекающего в пластине. Поскольку напряжённость и магнитная индукция МП – векторные величины, показания датчика зависят от ориентации пластины относительно направления МП, а также от неравномерности самого МП. Для того чтобы полнее охарактеризовать МП, необходимо представить его характеристики в трёх пространственных координатах.

Преимуществами датчиков Холла являются: малые размеры, простота использования и измерения электрического напряжения. Однако на метрологические характеристики датчиков существенно влияют: неравномерность свойств полупроводниковой пластины, наличие механических напряжений, вызванных пайкой электродов, размещение при измерениях в МП контура подводящих проводников (рамка с током в магнитном поле) и др. Для снижения влияния перечисленных причин на показания датчика принимаются соответствующие меры: компенсация (включение компенсационных сопротивлений), скручивание подводящих проводников (уменьшение площади петли с током). Диаграмма направленности датчика Холла близка к идеальной, что позволяет использовать его для определения направления вектора напряжённости МП. Наименьший порог чувствительности датчика Холла к повороту в МП составляет (5-10) минут.

Общие характеристики твердотельных полупроводниковых датчиков (преобразователей) Холла производства фирмы Honeywell типа SS приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Характеристики преобразователей Холла производства фирмы Honeywell

Марка	Диапазон, мГл	$U_{\text{пит}}$, В	Максимальное выходное напряжение, В	Чувствительность, В/Гл	Потребляемый ток, мА	Диапазон рабочих температур, °С
SS19	±40	4 – 10	$0,5 U_{\text{пит}}$	5 – 12,5	4	от -25 до +85
SS49	±40	4 – 10	$0,5 U_{\text{пит}}$	5 – 12,5	4	от -25 до +85
SS59	±100	3 – 6,5	1,75	17,5	10	от -40 до +100
SS495	±60	4,5 – 10	от 0,2 до $U_{\text{пит}}-0,4$	$31,25 \pm 2,5$	7	от -40 до +150
SS496	±84	4,5 – 10	от 0,4 до $U_{\text{пит}}-0,4$	25 ± 1	7	от -40 до +125

Преобразователи на основе эффекта рекомбинации электронно-дырочных пар в полупроводнике

Подсоединим плоскую полупроводниковую пластину с двух противоположных торцов к электродам и подключим их к источнику тока. Падение напряжения на пластине определяется величиной удельного электрического сопротивления диэлектрика. Предположим, что на боковых поверхностях (гранях) образца созданы зоны с разной скоростью рекомбинации пар электрон-дырка. Поместим пластину в магнитное поле, вектор напряженности которого направлен перпендикулярно боковым граням пластины. Под действием силы Лоренца будет происходить смещение носителей электрического заряда в направлении, перпендикулярном направлению протекания электрического тока. Электроны, попадая в зону повышенной скорости рекомбинации, рекомбинируют с дырками. В полупроводнике уменьшается концентрация носителей заряда, что эквивалентно увеличению сопротивления пластины. В результате, при постоянном значении рабочего тока, возрастает падение напряжения на пластине (рис. 3.53). Величина падения напряжения на пластине зависит от напряженности магнитного поля, воздействующего на пластину. Основанные на ре-

комбинационном эффекте преобразователи называются *гальваномагнитнокомбинационными* (ГМР - преобразователи).

На этом эффекте основан принцип действия прибора Ф 4356, предназначенного для измерений среднего значения индукции переменных магнитных полей в воздушных зазорах электрооборудования. Основные характеристики прибора приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Характеристики Ф 4356

Характеристика	Значение
Пределы измерений, мТл	0,1/0,3/1/3/10/30/100
Основная приведённая погрешность прибора, %	±4 на пределах 1,3,10,30 и 100 мТл ±10 на пределах 0,1 и 0,3 мТл
Нормальная частота измеряемого МП	50 – 1000 Гц на пределах 0,1 – 3 мТл 50 Гц на пределах 10 – 100 мТл
Рабочий частотный диапазон прибора	20 – 20000 Гц на пределах 0,1 и 0,3 мТл
Время установления показаний, с	Не более 4
Питание прибора	От сети переменного тока напряжением 220 В ±10% 50±0,5 Гц
Потребляемая мощность, ВА	Не более 10
Габаритные размеры, мм	310x230x150
Масса, кг	4,5
Измерительный зонд	ГМРП-4 размерами 50x5x1 мм
Условия применения	Температура окружающего воздуха от 10 до 35 ⁰ С Относительная влажность до 80 % при 25 ⁰ С

Преобразователи, основанные на тепловом эффекте поглощения излучений

Для измерений ЭМП в СВЧ диапазоне применяются преобразователи, основанные на тепловом эффекте поглощения излучения чувствительным элементом.

Для измерений ЭМП мобильного телефона или микроволновой печи используется широкополосный измеритель плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитного поля марки ПЗ-18.

Основные элементы измерителя ППЭ:

- антенна – преобразователь АП – ППЭ – 1;
- индикатор Я6П – 110;
- сетевой (встроенный) и аккумуляторный блоки питания.

Работа измерителя основана на приёме и преобразовании СВЧ сигнала в напряжение постоянного или квазипостоянного тока антенной – преобразователем (АП) и отсчёта значения напряжения постоянного тока цифровым индикатором. Отсчёт измеряемой величины производится в децибелах (дБ).

АП выполнена в виде системы последовательно соединённых тонкоплёночных термопар (многоспайная дифференциальная термопара), размещённых радиально на конической поверхности. Такое расположение термопар обеспечивает изотропность диаграммы направленности измерителя ППЭ. При помещении АП в ЭМП, между приближенными к источнику и удалёнными от него спаями возникает разница температуры из-за разной плотности поглощённой энергии. Суммарная термоЭДС усиливается линейным усилителем постоянного тока, размещённым в ручке АП, и передаётся на вход индикатора Я5П – 110. инерционность системы термопар требует выдержки АП при постоянной температуре длительностью не менее 30 минут. В индикаторе сигнал преобразуется по логарифмическому закону (логарифмический усилитель) и в цифровой форме (после АЦП) отображается на табло индикатора в дБ относительно нижнего предела измерений АП.

Абсолютное значение плотности поглощённой энергии Π определяется по формуле:

$$\lg(\Pi/\Pi_0) = (A_{\text{и}} - K_{\text{ф}} + K_{\text{да}})/10,$$

где: $\Pi_0 = 1 \text{ мкВт/см}^2$;

$A_{\text{и}}$ – показание индикатора, дБ;

$K_{\text{ф}}$ – поправочный коэффициент, обусловленный частотной зависимостью коэффициента преобразования АП, определяемый как логарифм отношения действительного коэффициента преобразования $K_{\text{пр}}$ к опорному значению K_0 : $K_{\text{ф}} = 10 \lg(K_{\text{пр}}/K_0)$ дБ. Для АП – ППЭ – 1 $K_0 = 1 \text{ мВ/мкВтсм}^{-2}$;

$K_{\text{да}}$ – коэффициент ослабления сигнала на входе индикатора Я6П – 110, который в зависимости от положения переключателя «род работы» равен 0 (0 ◀) или 10 дБ (10dB ◀).

В индикаторе аналоговый сигнал термопар преобразуется по схеме: фильтр нижних частот – логарифмический усилитель – АЦП – счётчик электрической величины – табло индикатора. Питание индикатора осуществляется двумя стабилизированными источниками постоянного напряжения 7,2 В и 12 В с номинальным током нагрузки 0,2 и 0,1 А.

Приборы инструментального контроля электрических и магнитных полей

При проведении инструментального контроля интенсивности МП в целях санитарно-эпидемиологической оценки в качестве измеряемого и оцениваемого параметра следует применять либо плотность магнитного потока в Тл, либо напряженность магнитного поля в А/м неискаженного МП (условия свободного пространства).

Первичный преобразователь (антенна) в зависимости от типа прибора может быть изотропным (ненаправленным) или требующим ориентации в зависимости от поляризации поля. Следует отдавать предпочтение приборам с изотропными антеннами - преобразователями. В качестве первичного преобразователя для регистрации МП в основном используются рамочные антенны (магнитные диполи) и датчики Холла.

Предварительная обработка и детектирование сигнала, а также индикация, могут осуществляться как в аналоговой, так и в цифровой форме.

Приборы для измерений интенсивности МП должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 51070-97 «Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний». Основная допускаемая относительная погрешность измерений интенсивности МП не должна превышать $\pm 20\%$.

Измеритель магнитного поля ИМП-05 (рис. 3.54) измеряет модуль вектора магнитной индукции, определяемый как квадратный корень из суммы квадратов трех его ортогональных составляющих.

Основная относительная погрешность измерения магнитной индукции в нормальных климатических условиях:

-не более $\pm 20\%$ при измеряемых значениях свыше 150нТл и до 1990нТл в полосе I и свыше 15нТл в полосе II:

-не более $\pm 30\%$ при измеряемых значениях от 70нТл до 150нТл в полосе I и от 7нТл до 15нТл в полосе II.

Основная погрешность прибора соответствует ряду по ГОСТ Р 51070-97 и указана с учетом корректировочных кривых, приведенных в паспорте на прибор.

Принцип действия: Переменное магнитное поле от исследуемого объекта наводит в трех ортогонально расположенных катушках антенны переменные напряжения, пропорциональные трем ортогональным составляющим вектора магнитной индукции. В тракте обработки принятые сигналы усиливаются, поступают на полосовые фильтры, затем детектируются и суммируются. После преобразования результирующего сигнала вычисляется значение магнитной индукции, равное корню квадратному из суммы квадратов трех ее ортогональных составляющих. Вычисленное значение индицируется на жидкокристаллическом цифровом индикаторе, проградуированном в нТл.

Измеритель электрического поля ИЭП-0,5 предназначен для измерения напряженности переменных электрических полей и применяются для пространственного обследования частотных полей, создаваемых техническими средствами. В качестве источников переменного электрического поля используется дипольная антенна и дисковый пробник.

Прибор с дисковым пробником предназначен для измерения напряженности переменных полей, создаваемых компьютерной техникой, в соответствии с ГОСТ Р 50949-01.

Прибор в пределах своих технических характеристик может использоваться для измерения электрической составляющей электромагнитного поля независимо от природы его возникновения.

Принцип действия ИЭП-0,5 заключается в преобразовании энергии электромагнитного поля с помощью антенны в напряжение, пропорциональное напряженности этого поля и не зависящее от его частоты. В тракте обработки

прибора принятый сигнал усиливается и детектируется в пределах выбранной полосы анализируемых частот. Значение напряженности электрического поля после аналого-цифрового преобразователя детектированного сигнала индицируется на жидкокристаллическом индикаторе в В/м.

3.9. Измерение характеристик ионизирующих излучений

Источниками ионизирующих излучений являются радиоактивные изотопы химических элементов природного или искусственного происхождения, а также ядерные реакции взаимодействия элементарных частиц и излучений с ядрами химических элементов.

Измерения ионизирующих излучений проводятся в целях охраны окружающей среды, защиты населения и персонала, исследования и контроля характеристик сред и физических объектов, изучения процессов в ядерно-физических установках.

Основные виды ионизирующих излучений (α , β , γ , n_0) обнаруживаются и регистрируются благодаря их взаимодействию с веществом. Законы и механизмы взаимодействия излучений с веществом хорошо известны и являются предметом ядерной физики.

Охарактеризуем кратко основные методы дистанционных измерений ионизирующих излучений.

3.9.1. Сцинтилляционный метод

Этот метод регистрации ионизирующих излучений основан на явлениях флуоресценции и вторичной электронной эмиссии.

Сцинтилляционный детектор представляет собой комбинацию сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (рис. 3.55). В сцинтилляторе падающим потоком ионизирующего излучения генерируются кванты света, которые, попадая на фотокатод, выбивают из него электроны, которые, в свою очередь, ускоряясь в электрическом поле, выбивают из расположенных последовательно

электродов все большее количество электронов. Коэффициент умножения первичных электронов пропорционален δ^n (δ – коэффициент вторичной эмиссии, n – число электродов умножителя). Измеряемое падение напряжения на анодной нагрузке является функцией плотности потока частиц (излучения).

В качестве сцинтилляторов используют неорганические (сульфид цинка, йодид натрия, йодид цезия) и легкие органические (антрацен, толуол и др.) вещества.

Для детектирования заряженных частиц (α , β) применяют йодид цезия, сульфид цинка и антрацен, а для β -частиц низких энергий – ^3He , ^{14}C и ^{35}S . При детектировании гамма-излучения первоначально, в результате фотоэффекта или эффекта Комптона, образуются электроны, вызывающие, в свою очередь, сцинтилляцию в NaI (Tl) , CsI (Tl) или в KI (Tl) – для низкоэнергетических γ -квантов.

Детектирование нейтронов производится с использованием смеси ^{10}B и сульфида цинка, при этом сцинтилляцию инициируют α -частицы.

Достоинствами сцинтилляционных детекторов являются высокая доля регистрируемых частиц и высокая эффективность детектирования γ -излучения. Недостатки в основном обусловлены не очень простой функцией преобразования фотоэлектронного умножителя. Малое время высвечивания фотовспышки (10^{-9} – 10^{-7} с) и зависимость ее интенсивности от поглощенной в сцинтилляторе энергии частицы позволяют применять сцинтилляционные детекторы для спектрометрии излучения.

Вторично-электронные умножители – детекторы, в которых используется эффект вторичной эмиссии электронов. Вторично-электронные умножители отличаются от упомянутых ранее фотоэлектронных умножителей тем, что у них нет вакуумного защитного баллона и флюоресцирующего входного окна. Однако в рабочем режиме в детекторе должен сохраняться высокий вакуум. Детектируемые частицы попадают непосредственно на катод, эмитирующий электроны, ускоряющиеся в электрическом поле между соседними электродами (100-300В), и вызывающие вторичную эмиссию электронов в последовательно

расположенных электродах (обычно 10-15 электродов). Коэффициент умножения потока электронов определяется коэффициентом вторичной эмиссии вещества электродов δ и их числом n : $\kappa = \delta n$. Выходным сигналом умножителя является напряжение на коллекторе (аноде). Они могут работать в токовом, но чаще работают в импульсном режиме.

3.9.2. Ионизационный метод

Ионизационный метод основан на явлении ионизации вещества в объеме детектора при прохождении через него излучения. Наиболее распространены три разновидности (группы) ионизационных детекторов: ионизационные камеры, газоразрядные детекторы, полупроводниковые детекторы.

Ионизационные камеры

Принцип действия ионизационной камеры основан на ионизации газа в объеме детектора частицами, испускаемыми стенками (радиатор) камеры при взаимодействии вещества стенок с нейтронами (нейтронные камеры) или с гамма-квантами (гамма-камеры). Нейтронные ионизационные камеры по применяемым нейтронно-чувствительным материалам разделяют на газовые, борные и деления.

В ионизационной газовой прослойке камеры под действием приложенной разности потенциалов между электродами камеры протекает электрический ток. По режиму работы различают импульсные и токовые камеры. Токовые камеры могут работать в режиме регистрации мощности токового шума. Схемы простых конструкций ионизационных камер показаны на рис. 3.56, а режимы работы всех типов ионизационных детекторов - на рис.3.57.

Показанные на рисунке области соответствуют различным режимам ионизации газа и различным типам детекторов:

1 – при малых напряжениях скорости ионов невелики, вероятность их рекомбинации до достижения электрода велика. В этой области ток камеры пропорционален разнице потенциалов (напряжению) на электродах.

2 – по мере увеличения напряжения растет средняя скорость ионов и уменьшается вероятность их рекомбинации. В области неполной пропорциональности увеличиваются отклонения от закона Ома.

3 – начиная с некоторого напряжения рекомбинация становится пренебрежимо малой и ток камеры не зависит от напряжения. Эта область называется областью насыщения камеры. В таком режиме работают токовые камеры, в которых сила тока пропорциональна заряду переменных ионов, а значит и потоку ионизирующего излучения.

4 – в этой области потоки ионов и электронов обладают энергией, достаточной для ионизации атомов газа. Образуются вторичные ионы и электроны, которые, в свою очередь, также способны ионизировать газ. Этот процесс называется ударной ионизацией. В нем имеет место многократное умножение плотности ионизации, коэффициент умножения не зависит от количества первичных ионов. В режиме ударной ионизации работают пропорциональные счетчики. Ток камеры при данном напряжении на электродах пропорционален заряду первичных ионов, а значит и потоку частиц.

5 – в этом режиме коэффициент умножения зависит от количества первичных ионов и он называется **полупропорциональным**.

6-8 – в начале этой области напряжение настолько велико, что газоразрядный детектор переходит либо в режим счетчика Гейгера-Мюллера (сплошная линия), либо в режим коронного счетчика (пунктирная линия). Это напряжение называют потенциалом зажигания, поскольку в коронном детекторе зажигается коронный разряд, а в счетчиках Гейгера-Мюллера последовательно реализуются режимы: самогашения разряда, или область Гейгера (область 6), нестабильного коронного разряда (область 7) и стабильного коронного разряда (область 8).

Ток камеры обычно измеряют с помощью преобразователя тока-напряжение (рис. 3.58).

Если ионизационная камера работает не в токовом, а в импульсном режиме, то она подключается к токовому или зарядовому усилителям.

В детекторах различных типов применяют различные рабочие газы и их смеси. В ионизационных камерах, предназначенных для регистрации α и β частиц, газ заполнения – воздух при давлении ниже атмосферного, для регистрации рентгеновского и гамма-излучения – тяжелые газы Ar, Хе, для регистрации нейтронов - $^3\text{He} + ^4\text{He}$ и BF_3 .

Газоразрядные счетчики

Режимы работы газоразрядных счетчиков лежат в областях, показанных на рис.3.57 под номерами 4, 6 – 8. К ним относятся пропорциональные счетчики, счетчики Гейгера-Мюллера, коронные счетчики.

Пропорциональные счетчики успешно применяются для регистрации нейтронов. Рабочий газ в этих счетчиках – BF_3 , ^3He .

Коэффициент умножения составляет $10^2 - 10^5$ и зависит от газа заполнения детектора. Благодаря тому, что амплитуда импульса тока пропорциональна потере энергии частицы в объеме детектора, существует возможность разделения сигналов по видам частиц (α , β , γ).

Счетчики Гейгера-Мюллера (ГМ) нашли широкое применение для регистрации γ , β – частиц благодаря высокой чувствительности, простоте конструкции и малым габаритам. Счетчики Гейгера-Мюллера могут быть использованы только для детектирования частиц, а не для измерения их энергии, так как амплитуда выходного сигнала в реализуемых режимах ионизации не зависит от числа первичных ионов, образованных регистрируемой частицей. Коэффициент умножения в счетчиках Гейгера-Мюллера составляет $10^7 - 10^{10}$. Для регистрации нейтронов применяют счетчики с борным радиатором и рабочим газом $^{10}\text{BF}_3$, для α , β , γ – неон-галогеновые смеси, Ar + CO_2 . Эффективность регистрации α и β -частиц пропорциональным и ГМ-счетчиками близка к 100%, а γ -квантов – менее 1%.

Коронные счетчики конструктивно мало чем отличаются от других газоразрядных счетчиков. Рабочие газы в них – Na + Ar или He + Ar.

Все типы газоразрядных счетчиков работают при довольно высоком напряжении на электродах. Это налагает повышенные требования на свойства применяемой электроизоляции. Сопротивление и напряжение пробоя изоляторов и линий подвода напряжения должны быть очень высокими.

Вакуумные камеры

Взаимодействие детектируемых частиц с веществом радиатора вакуумной камеры приводит к эмиссии носителей заряда, которые ускоряются в электрическом поле, создаваемом внешним источником, в вакуумном зазоре между электродами камеры. Первичными носителями заряда могут быть электроны, α -частицы, осколки деления тяжелых ядер. В ряде случаев на собирающем электроде могут образоваться электроны вторичной эмиссии. Тогда результирующий ток камеры равен разнице токов первичной и вторичной эмиссии на обоих электродах (для коаксиальной цилиндрической камеры):

$$i_k = i_1 - i_2 = \text{const } e\pi d_1 L \varphi [\Psi_{1,2} F_1(U_k) - \Psi_{2,1} \frac{d_2}{d_1} F_2(U_k)],$$

где: d_1, d_2 – диаметры радиатора и собирающего электрода;

e – заряд электрона;

L – длина электродов, $L \gg (d_2 - d_1)/2$;

φ – плотность потока нейтронов;

$\Psi_{1,2}, \Psi_{2,1}$ – чувствительность 1-го и 2-го электродов к нейтронам;

$F_1(U_k), F_2(U_k)$ – функции 1-го и 2-го электродов, зависящие от напряжения на камере U_k и ее геометрии.

В нейтронной вакуумной камере в качестве радиатора используют вещества, в которых при взаимодействии с нейтронами образуется β^- - радиоактивные ядра с малым периодом полураспада: Rh, V, Ag, делящиеся нуклиды (ионы осколков деления), ^{10}B (α -частицы). В гамма-камерах первичными носителями заряда являются комптоновские и фотоэлектроны вещества радиатора и электроны вторичной эмиссии. Напряжение между электродами вакуумных камер достигает 200 В.

Полупроводниковые детекторы

Ионизирующее действие частиц в полупроводнике заключается в образовании пар электрон-дырка. Энергетические затраты при этом в 10 раз ниже необходимых для ионизации одной молекулы газа, кроме того плотность твердого вещества гораздо выше, чем газообразного. Следовательно, чувствительность полупроводниковых детекторов гораздо выше ионизационных газонаполненных. Направленное движение образующихся носителей электрического заряда осуществляется путем создания в полупроводнике сильного электрического поля. В качестве чувствительных элементов применяют пластинки кристаллов *кремния, германия, германия, легированного литием*. Для снижения влияния термодиффузионных токов полупроводниковые детекторы эксплуатируются и хранятся при очень низких температурах (в жидком азоте). В измерительной цепи используются электронные схемы преобразования импульсов и зарядовые усилители. Полупроводниковые детекторы нашли широкое применение в системах спектрометрии γ -излучений. Энергетическое разрешение современных германиевых детекторов достигает долей кэВ при диапазоне энергий от 0 до 10 МэВ.

3.9.3. Эмиссионный метод

Эмиссионный метод основан на регистрации тока заряженных частиц (электронов и ионов), эмитируемых веществом электрода (эмиттера, радиатора) при взаимодействии с ним детектируемого излучения. По принципу создания направленного движения носителей заряда эмиссионные детекторы подразделяются на две группы: с самопроизвольным и с принудительным движением носителей заряда в объеме детектора. К первой группе относятся детекторы прямого заряда (ДПЗ), ко второй – вакуумные камеры и вторично – электронные умножители.

Детекторы прямого заряда

Принцип действия ДПЗ основан на эмиссии β -частиц или электронов, сопровождающей взаимодействие нейтронов или гамма-квантов с веществом (эмиттером) детектора. Возникновение β -частиц обусловлено радиоактивным распадом составного ядра, образовавшегося по (n, γ) реакции: ${}^A_z X(n, \gamma) {}^{A+1}_z X \xrightarrow{\beta^-} {}^{A+1}_{z+1} X$. Электроны образуются в эмиттере в основном в результате фотоэффекта и комптоновского рассеяния мгновенных гамма-квантов, испускаемых в реакции (n, γ) . По использованию двух этих эффектов ДПЗ разделяют на комптоновские и активационные. Испускаемые эмиттером высокоэнергетические частицы пролетают слой изоляции, попадают на поверхность электрода (коллектора) и поглощаются им. Возникающий при этом электрический ток в цепи детектора и является его выходным сигналом. ДПЗ как источник электричества, является генератором тока.

Основные достоинства ДПЗ: простота конструкции, малые размеры, отсутствие внешнего источника питания, генерируемый электрический сигнал. К недостаткам ДПЗ относят: невысокую чувствительность, ограниченный выбор материалов эмиттера, выгорание эмиттера в потоке нейтронов, высокие требования к сопротивлению изоляции, инерционность более чувствительных активационных детекторов. В табл. 3.12 приведены основные эмиссионные характеристики распространенных в качестве эмиттеров ДПЗ материалов.

Таблица 3.12

Материалы детекторов ДПЗ

Эмиттер	Чувствительность к нейтронам, $10^{-20} \text{ А} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$				Чувствительность к гамма-квантам, $10^{-10} \text{ А} \cdot \text{кг} / \text{Вт}$	$(\eta_\gamma / \eta_\beta) / (\eta_\gamma / \eta_m)_{Rh}$	Тип ДПЗ
	η_m	η_{im}	η_a	η_k			
Ванадий	1,8	0,7	1,8	0,09	-0,94	11	Нейтронный, активационный
Кобальт	0,75	2,1	-	0,75	-0,58	18	Нейтронный, комптоновский
Родий	27	80	25	2	1,15	1	Нейтронный, активационный
Серебро	11,2	50	10	1,2	1,26	2,6	Нейтронный, активационный
Кадмий	3,2	-	-	3,2	1,26	9	Нейтронный, комптоновский
Эрбий	2,4	-	-	2,4	2,08	20	Нейтронный, ком-

Эмиттер	Чувствительность к нейтронам, $10^{-20} \text{ А} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}$				Чувствительность к гамма-квантам, $10^{-10} \text{ А} \cdot \text{кг} / \text{Вт}$	$(\eta_\gamma / \eta_\alpha) / (\eta_\gamma / \eta_m)_{Rh}$	Тип ДПЗ
	η_m	$\eta_{нт}$	η_α	η_κ			
Гафний	1	-	-	1	2,02	43	потоновый Нейтронный, комптоновый
Платина	0,11	0,7	0,02	0,09	5,4	1150	Нейтронный и гамма-ДПЗ

Примечания:

- чувствительность приведена для эмиттеров диаметром 1 мм и длиной 1 м;
- $\eta_m, \eta_{нт}$ – чувствительность к тепловым и надтепловым нейтронам;
- η_α, η_κ – активационная и комптоновская чувствительность;
- η_γ – чувствительность к гамма-квантам.

В качестве эмиттеров гамма-ДПЗ применяют также материалы с большим атомным номером, поскольку сечение взаимодействия гамма-квантов с веществом растет по мере увеличения его атомного номера.

В качестве материалов изоляции ДПЗ применяют кварц, MgO, Al₂O₃.

Основное уравнение преобразования потока частиц в ток детектора (*основное уравнение ДПЗ*) в простейшем случае детектирования потока моноэнергетических нейтронов в диапазоне линейности ДПЗ записывается в виде:

$$i + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{di}{dt} = (f + \alpha)e\Sigma\varphi + \frac{\alpha e \Sigma}{\lambda} \cdot \frac{d\varphi}{dt},$$

где i – ток детектора;

φ – плотность потока нейтронов;

Σ – макроскопическое сечение поглощения нейтронов веществом эмиттера;

λ – постоянная радиоактивного распада ядра ${}^{m+1}_zX$;

f – коэффициент возмущения нейтронного потока детектором и неполноты регистрации β -частиц из-за поглощения в эмиттере и в изоляторе;

α – тоже для комптоновских и фотоэлектронов;

e – заряд электрона.

Нейтронными ДПЗ с наиболее чувствительным родиевым эмиттером могут детектироваться плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне 10^{11} – 10^{16} н/см²с. Разброс чувствительности (идентичность) в ДПЗ с родиевым эмит-

тером достигает $\pm(2 - 6)\%$, а серебряных - $\pm 20\%$. Относительные изменения потока нейтронов обычно детектируются с погрешностью менее 1%.

3.9.4. Тепловой метод

Тепловой метод детектирования ионизирующих излучений основан на эффекте поглощения энергии частиц веществом детектора и реализуется в, так называемых, калориметрических детекторах. Соотношения, описывающие принципы измерений количества тепла в калориметрах различных типов, приведены ранее. Детекторы, применяемые для регистрации гамма-излучения, называют гамма - калориметрами, а для регистрации нейтронов – термо-нейтронными детекторами.

Общие достоинства калориметрических детекторов всех типов: простота конструкции, невысокие требования к сопротивлению изоляции, несложная схема измерения (измерение температуры), приемлемая чувствительность. Основные недостатки: инерционность, нелинейность характеристики.

Конструктивно детектор содержит рабочее тело, размещенное в корпусе с промежуточной твердотельной, газовой или вакуумной теплоизолирующей прослойкой и термодпары для измерения температуры или перепада температур в детекторе. В качестве рабочего тела для измерения мощности дозы, поглощенного гамма-излучения (Q_γ) применяют вещества с большим атомным номером (Z), поскольку $Q_\gamma \sim Z^n$ (рис.3.59).

Для детектирования тепловых нейтронов применяют борсодержащие и делящиеся вещества, а быстрых нейтронов – водородосодержащие и другие замедлители.

Микрокалориметры (гамма - термометры, детекторы интегрального теплового потока – *калориметры Кальве*) позволяют измерить мощность поглощенной дозы гамма-излучения в диапазоне от 0,01 до примерно 20 Вт/г.

Практический диапазон измерений термо-нейтронных детекторов ограничивается плотностью потока тепловых нейтронов 10^{13} н/см²с.

Погрешность калориметрических детекторов может достигать $\pm 30\%$. При принятии специальных мер по уменьшению погрешности и при больших значениях мощности поглощенной дозы она может быть уменьшена до $\pm(1-2)\%$. Максимальная температура применения калориметрических детекторов составляет $400 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, но имеются сведения и о применении высокотемпературных калориметров до $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.10. Электроизоляционные материалы датчиков

Максимальные температуры применения датчиков деформации и перемещения, как правило, существенно ниже, чем датчиков температуры. В результате этого и число применяемых материалов гораздо шире.

В отличие от проводников, в большинстве видов изоляции электрическое сопротивление уменьшается с увеличением температуры. Характер изменения сопротивления при увеличении температуры реального изолятора определяется не только зависимостью удельного электрического сопротивления от температуры, но влиянием других факторов и процессов: термодиффузионными токами, ионизирующими воздействиями, наличием примесей в материале изолятора, адсорбированной кристаллизационной влаги и др.

Компактная изоляция

Керамические изоляционные материалы – оксиды алюминия, магния, бериллия и др. относятся к диэлектрикам, но в определенных условиях они проявляют свойства, характерные для полупроводников. Внешние электрические поля, повышенная температура, ионизирующие излучения и др. инициируют электрические явления, вызывающие протекание электрического тока в измерительной цепи, искажающего полезный сигнал датчика. Искажения сигнала, как правило, более существенны при нестационарных воздействиях, поскольку электрические явления в изоляторах носят релаксационный характер и обычно чувствительны к скорости изменения внешнего воздействия.

В минеральных изоляторах уменьшение с ростом температуры (T) величины изоляции (R) обычно описывается зависимостью вида $\lg R = a + b/T$ (рис. 3.60). Такая зависимость типична для полупроводников n -типа с электронным характером проводимости.

При повышенной температуре на сопротивление минеральной изоляции существенно влияет подготовка изолятора (кабеля) и защита его от воздействий атмосферы и, особенно, влаги (рис. 3.61).

В плохо просушенном и не герметизированном кабеле с керамической порошковой изоляцией при повышенных температурах сопротивление изоляции может изменяться «непредсказуемо» (рис. 3.62).

Увеличение сопротивления изоляции при медленном нагреве в диапазоне температур от 100°C до 400°C объясняется испарением и удалением из диэлектрика сорбированной и (при более высокой температуре) кристаллизованной влаги.

Термодиффузионные токи не стационарны, что является следствием протекания неустановившихся электрических процессов в диэлектрике. В течение длительной выдержки при постоянной температуре сила термодиффузионного тока медленно (десятки минут или часы) снижается.

Кроме термодиффузионных токов в диэлектрике могут возникать импульсы тока абсорбционной природы, например, при подаче потенциала на электрод в процессе измерения электрического сопротивления. Абсорбционный ток достигает в импульсе десятков наноампер и зависит от величины напряжения смещения. Импульс абсорбционного тока существует в диэлектрике после снятия потенциала с электрода в течение нескольких минут.

Для токовых и миниатюрных калориметрических детекторов сила тока более 100 нА уже существенно может исказить полезный сигнал.

При температурном воздействии на оксидную изоляцию возможно также проявление эффекта униполярной проводимости. Главными условиями возникновения этого эффекта являются – контакт диэлектрика с проводником (электродом) и наличие контактной разницы потенциалов.

При контакте металла, работа выхода электрона в котором больше работы выхода в полупроводнике n-типа, в последнем образуется слой толщиной примерно 10^3 атомных слоев, обедненный электронами проводимости (электроны перетекают в металл) и потому обладающий высоким удельным электросопротивлением. Этот слой называют запирающим, так как подключение к металлу отрицательного потенциала (обратное включение) увеличивает потенциальный барьер для протекания электронов проводимости в металл и резко снижает электропроводность. Электрический ток течет через этот слой полупроводника лишь при прямом включении («+» на электроде). Плотности прямого и обратного токов определяются соотношениями:

$$j_{np} = j_s [\exp(eV/kT) + 1];$$

$$j_{об} = j_s [\exp(-eV/kT) - 1],$$

где j_s – плотность тока насыщения;

e – заряд электрона;

V – потенциал на электроде;

k – постоянная Больцмана;

T – температура.

При $eV/kT \gg 1$ плотность обратного тока стремится к плотности тока насыщения, а плотность прямого тока значительно превышает плотность тока насыщения.

В материалах оксидной изоляции (BeO , MgO , Al_2O_3) работа выхода электрона находится в пределах 3 – 5 эВ, а в металлах (Mo , Fe , Ni , W) – в пределах 4,3 – 4,6 эВ.

Изоляционные покрытия

Для изоляции элементов датчиков необходимы пропиточные, покровные и заливочные составы.

В качестве пропиточных составов применяют растворы и суспензии, твердеющие после термической обработки. Эти жидкости должны обладать низкой вязкостью, хорошо пропитывать обмотки и цементировать их. Наиболее

нагревостойки пропиточные составы на основе кремнийорганических связующих марок СПВ. Максимальная температура их длительного применения достигает 850⁰С. Недостаток составов СПВ – ограниченный срок хранения.

В составы марок СПВ входят минеральные наполнители и кремний - органические связующие. Электрическое сопротивление, механическая прочность и достаточная пластичность покрытия из СПВ-554М сохранялись при длительном применении в газовой среде, не содержащей следов масла, до температуры 800⁰С. При наличии паров масла происходили своего рода графитизация покрытия и потеря им электросопротивления.

Известно несколько основных типов электроизоляционных покрытий: органосиликатные, стеклокерамические, металлофосфатные. Для материалов покрытий важны: адгезия к различным материалам, стойкость к термоударам, пыле- и влагостойкость.

В исходном состоянии органосиликатные (ОС) материалы – это мелкодисперсные суспензии силикатов и оксидов в толуольных растворах кремнийорганических (КО) полимеров. Максимальная температура длительного применения органосиликатных составов марок ОС 700-800⁰С.

Стеклокерамические покрытия представляют собой зерна керамического наполнителя в стекловидной матрице. Разработанные отечественные стеклокерамические составы длительно работоспособны при температуре 800-850 °С. Наилучшими диэлектрическими свойствами обладают составы с наполнителями из Al₂O₃, MgO.

В качестве заливочных компаундов, кроме упоминавшихся алюмофосфатных составов, можно применять составы марок ОС. Удовлетворительными характеристиками обладает простой состав на основе порошка алунда в качестве наполнителя и кремнийорганического лака марок КО в качестве связующего. Этот состав готовят непосредственно перед употреблением, необходимую консистенцию регулируют количеством наполнителя.

Из выпускаемых промышленностью обмоточных проводов удовлетворительной нагревостойкостью обладают провода марок ПОЖ со стекловолокон-

ной изоляцией, пропитанной органо-силикатным составом, а также ПНЭТ-имид с изоляцией на основе полиимидов. Однако, выпускаемые промышленностью провода марок ПОЖ имеют диаметр более 0,5 мм (с изоляцией), и их применение увеличивает габариты датчика.

В элементах датчиков и линий связи применяют также синтетические полимеры: пластики и эластомеры. Температурный предел их применения редко превышает 350-400° С.

Использование никелированной медной жилы позволяет обеспечить более надежное эмалирование и повысить температуру длительного применения обмоточных проводов с изоляцией из полиимидов до 300⁰С и даже до 400⁰С.

В различных условиях эксплуатации (влажность, загрязнения, ионизирующие излучения и др.) в качестве изоляционных покрытий применяются также кремнийорганические лаки, полистирол, полиэтилен, силиконовые пластики, силоксаны (синтетические каучуки). Температура применения силиконовой изоляции не превышает 200⁰С. Эластомеры (силоксаны) выдерживают длительное применение при температурах ниже 300⁰С.

Сопротивление (R) обмоточных проводов обычно снижается с ростом температуры (T) по зависимости вида: $R=Aexp(B/T)$.

На рис. 3.63 показан общий характер зависимости средней наработки до отказа обмоточных проводов с высокотемпературной кремнийорганической изоляцией. Повреждение провода при низких температурах определяется старением, а при высоких температурах – термическим разрушением изоляции.

4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИ

Метрологической надёжностью называют надёжность СИ в части сохранения его метрологической исправности.

Метрологической исправностью называют состояние СИ, при котором все нормируемые МХ соответствуют установленным требованиям.

Если в определении метрологической надежности СИ придерживаться терминологии общей теории надежности, то термин *метрологическая надежность* можно определить как *способность СИ сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени и определенных условиях и режимах эксплуатации*.

В процессе эксплуатации происходят изменения характеристик СИ. Эти изменения могут быть монотонными или флуктуирующими и достигать значений, приводящих к отказам. Отказы СИ подразделяют на неметрологические и метрологические.

Метрологический отказ – выход МХ средства измерений за установленные пределы.

Неметрологический отказ – выход СИ из строя и невозможность выполнять свои функции вследствие причин, не связанных с изменением МХ.

Метрологические отказы СИ происходят гораздо чаще неметрологических. Именно поэтому очень актуальна проблема разработки методов прогнозирования, предотвращения и обнаружения метрологических отказов.

По характеру проявления отказа могут быть внезапными или постепенными. Внезапный отказ характеризуется скачкообразным изменением одной или нескольких МХ. Такой отказ проявляется случайно и его прогнозирование практически невозможно. Однако подобный отказ легко обнаруживается и потому называется явным. Проявление внезапных отказов характеризуется постоянством их интенсивности во времени, что упрощает анализ надежности СИ по этому виду отказов. Показателями надежности для подобных отказов могут быть: вероятность безотказной работы или вероятность отказа (при заданной наработке), наработка до отказа, наработка между отказами (для восстанавливаемых СИ).

Постепенный отказ характеризуется монотонным изменением МХ. Прогрессирующий отказ обнаруживается не сразу и потому называется скрытым. Постепенный отказ выявляется только по результатам периодического контроля СИ.

Анализ надежности СИ при наличии постоянных отказов – сложная проблема, поскольку в процессе эксплуатации МХ меняются и достигают граничного состояния в течение длительного времени. Другими словами, отказ СИ растянут во времени, а все состояния СИ в процессе развития отказа до достижения предельного характеризуются как работоспособные, отличающиеся уровнем эффективности функционирования или степенью приближения погрешности к предельно допустимой.

Характеристики долговечности, безотказности, ремонтпригодности и сохраняемости составляют обобщенное понятие надежности изделия вообще и СИ в частности.

Важной характеристикой СИ, определяющей в значительной мере его долговечность и безотказность, является стабильность или неизменность во времени его МХ.

Изменение во времени МХ – важнейшее с точки зрения применения свойство СИ. Изменение МХ во времени обусловлено процессами старения в его узлах и элементах, вызываемыми внешними воздействиями. Основным параметром здесь является время.

Для целей прогнозирования состояния СИ и разработки мер сохранения его работоспособности развиваются методы математического моделирования. Задача определения метрологической надежности СИ состоит в построении математической модели изменения МХ во времени. Поскольку изменения МХ во времени процесс случайный, то основным инструментом построения математической модели является теория случайных процессов. Состояние СИ во времени можно качественно представить как показано на рис.4.1.

В общем случае модель изменения погрешности во времени может быть представлена в виде: $\Delta(t) = \Delta_0 + F(t)$, где Δ_0 – начальная погрешность СИ; $F(t)$ – случайная для совокупности СИ данного типа функция времени.

Точное выражение функции $F(t)$ практически невозможно. Поэтому в практике измерений применяют несколько видов этой функции. Простейший из них – линейная функция. Практика подтверждает применимость линейной

функции для описания старения СИ в течение времени от одного до пяти лет. При более длительных временах экспериментально наблюдаемые частоты отказов не совпадают с расчетными. Периодичность метрологических отказов или частота отказов в единицу времени зависят от реальной функции изменения во времени погрешности СИ. Это иллюстрирует рис.4.2.

В приведенных на рисунке зависимостях предполагается, что после достижения предельной погрешности, производится восстановление начальной погрешности СИ. Ясно, что это несколько идеализированное представление о ремонтпригодности СИ. Тем не менее, приведенные на рисунке кривые качественно правильно характеризуют взаимосвязь частоты отказов с функцией изменения погрешности СИ: линейное изменение погрешности предопределяет постоянную частоту отказов и одинаковые межремонтные интервалы; экспоненциальному изменению погрешности соответствует нарастающая или убывающая частота метрологических отказов. Экспоненциальные модели хотя и более универсальны по сравнению с линейной, но при больших временах также не соответствуют действительности. Более реалистична так называемая логистическая модель, в которой изменение погрешности во времени описывается более сложной функцией, вид которой приведен на рис.4.3. Так назвал эту модель бельгийский математик Ферхюльст, применившие ее для описания роста численности населения. Почему он назвал ее так – не известно. Это S – образная кривая. Для погрешности ее можно записать в виде:

$$\Delta(t) = \frac{\Delta_0 \exp(kt)}{1 + \frac{\Delta_0}{\Delta_{np}} [\exp(kt) - 1]}, \text{ где } k = d\Delta(t)/dt.$$

Упомянутые выше модели рассматривают идеализированные случайные процессы изменения МХ. В реальности все гораздо сложнее из-за флуктуаций, обратимости процессов изменения параметров, неполноты восстановления МХ и др. Существуют довольно сложные модели, в которых предприняты попытки учесть и эти процессы.

Одной из основных мер по поддержанию СИ в метрологически исправном состоянии является его *периодическая поверка*. Периодичность поверки естественным образом должна быть согласована с требованиями к надежности СИ.

Для проведения периодических поверок определяются оптимальные временные интервалы, называемые *межповерочными интервалами*. Рекомендации по назначению межповерочных интервалов содержатся в соответствующих НТД.

Межповерочные интервалы устанавливаются в календарном времени для СИ, изменение МХ которых обусловлено старением и не зависит от интенсивности эксплуатации. Для СИ, изменение МХ которых обусловлено износом и зависит от интенсивности эксплуатации, межповерочные интервалы (МПИ) устанавливаются в значениях наработки. Для определения МПИ выбирают МХ, определяющие состояние метрологической исправности СИ. При этом учитывается опыт эксплуатации однотипных СИ, а также экономические критерии целесообразности ремонтов и восстановлений МХ конкретных СИ.

Рекомендации по теме содержатся в НД:

- МИ 2187-92. ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
- МИ 1872-88. ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика определения и корректировки.
- ИСО 10012-1. Требования, гарантирующие качество измерительного оборудования.

5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Интенсивное развитие измерительной техники в наше время обусловлено несколькими причинами, наиболее важными из которых являются:

- стремительный прогресс в области микро и нанотехнологий, обеспечивший технологическую базу развития микроэлектроники и микросистемной техники;
- значительно возросшие потребности в точных измерениях в областях, связанных с безопасностью для жизни и здоровья людей, с охраной окружающей среды и живой природы, с современными технологиями, в первую очередь, нанотехнологиями, с торговлей, в первую очередь, продуктами питания и др.;
- необходимость существенного уточнения фундаментальных констант и связанного с этим переопределения единиц физических величин в интересах научно-технического прогресса и познания в целом.

5.1. Метрологическое обеспечение нанотехнологий

Первые признаки зарождающейся эпохи микросистемной техники и связанной с ней нанотехнологией появились в 60-тых годах 20-го столетия. В нашей стране практическое использование этих технологий воплотилось в создание нового класса первичных преобразователей, чувствительные элементы которых представляли собой гетероэпитаксиальные пленки кремния на монокристалле сапфира. Это были широко известные тензорезисторные преобразователи давления САПФИР.

Начало 21-го века характеризуется нарастающим интересом к нанотехнологиям, выражающемся, в частности, в увеличении объема финансирования исследований в этой сфере в развитых странах мира. В США, например, в 2000 году принята национальная программа развития нанотехнологий, названная Национальной технологической инициативой. Финансирование этой программы в 2000 г. составляло 280 млн. долларов, в 2003 г. – более 700 млн., а с 2005 г. на ближайшие 4 года запланировано вложить 3,7 млрд. долларов. Согласно экспертным оценкам, на метрологическое обеспечение развивающейся наноэлектроники в США ежегодно расходуется более 40 млрд долларов. Рынок сбыта эталонов ширины линии (фотошаблонов) в 2008 году достиг 2 млрд долларов. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) разрабатывает все более точные эталоны ширины линии. Для объектов нанотехнологий

размерами менее 100 нм^2 пока нет очевидных решений по их метрологическому обеспечению. Требуется разработка приборов на новых физических принципах.

Потребность в метрологическом обеспечении нанотехнологий – острейшая, поскольку эти технологии охватывают практически весь спектр областей деятельности человека.

В России в 2007 г. создан Национальный научный центр по нанотехнологиям (на базе Курчатовского института. Его финансирование на первые 3 года запланировано в объеме 28 млрд. руб. (около 1 млрд. долларов). В своем ежегодном послании Совету Федерации 26.04.2007 г. президент Путин объявил об утверждении им Национальной программы по нанотехнологиям и о финансировании ее в объеме 180 млрд. руб. (дополнительно к запланированным расходам на науку и образование). Позднее, Федеральным законом № 139-ФЗ от 19.07.2007 года была учреждена «Государственная корпорация нанотехнологий (РОСНАНО)» с уставным капиталом в 130 млрд руб. Пока топ-менеджеры РОСНАНО озабочены лишь выгодным размещением «временно» свободных активов в банках под «хорошие» проценты. Как бы развитие нанотехнологий в России этим и не завершилось, ведь корпорацию возглавил г-н Чубайс!

Динамика уменьшения размерного ряда механизмов, приборов и их деталей и элементов с середины 20-го столетия, а также увеличения требуемой точности при исследованиях и контроле качества продукции приведена на рис. 5.1.

Согласно прогнозам, содержащимся в Международной и Национальной (США) технологических маршрутных картах полупроводниковой промышленности, критический размер микросхем к 2014 году достигнет 22 нм, а неопределенность его измерения должна составить 0,2 нм.

Требуемая точность в нанотехнологиях зависит от определяемого параметра: параметры формы – 1 нм; шероховатость поверхности – 0,1 нм; отклонение толщины пленок – 0,01 нм.

Средства измерений, а точнее, аппаратура для исследований наноструктур, разрабатываются и выпускаются, однако отсутствуют: средства поверки и калибровки, поверочные схемы для измерений линейных размеров, эталоны

единиц длины в нанометровом диапазоне, меры длины, стандартные образцы рельефа поверхности, нормативные документы. Это снижает качество контроля при производстве и качество самих изделий.

В США действует Национальная программа метрологического обеспечения микроэлектроники (National semiconductor metrology program). В нашей стране аналогичной программы пока нет. В то же время, хорошо известно, что опережающее развитие метрологического обеспечения является объективной предпосылкой внедрения новых наукоемких технологий. Следует отметить, что проблема метрологического обеспечения линейных измерений в нанометрическом диапазоне пока еще полностью не решена нигде в мире.

Основным инструментом для исследований и измерений наноразмерных объектов являются микроскопы, в которых используются различные физические принципы и методы воздействия на исследуемый объект: световые, электронные и ионные пучки, акустоэлектронные взаимодействия, рентгеновское излучение, туннельные потоки носителей заряда, силовые поля на сверхмалых расстояниях и др. На рис. 5.2 показаны возможности современных микроскопов по достигаемому пространственному разрешению.

Калибровка этих высокоточных приборов может осуществляться с помощью периодических мер малой длины в виде голографических дифракционных решеток, период которых (порядка половины длины волны) может быть измерен лазерным интерференционным дифрактометром с погрешностью около 1 нм.

Однако, сложившаяся практика линейных измерений привела к созданию мер малой длины на основе рельефных шаговых структур с заданными шириной, глубиной и профилем элементов. Линейная мера с рельефной прямоугольной структурой представляет собой набор щелевидных канавок прямоугольного профиля на поверхности кремния. Длина канавок – 5 мкм, расстояние между ними – 10 мкм, глубина от 0,1 до 20 мкм. Аттестуемый размер - ширина канавки (100 – 500 нм). Требуемая погрешность – не более 1 нм.

Для координатных измерений в датчиках эталонной точности могут применяться двумерные дифракционные решетки.

Для обеспечения единства и точности измерений в нанометровом диапазоне требуются установки высшей точности и поверочная схема, в которой при переносе единицы длины от первичного эталона к рабочим средствам измерений минимизировано снижение точности. В многоступенчатой поверочной схеме переход от эталона к рабочим СИ приводит к увеличению неопределенности измерений от 0,02 нм до 100 нм. Для развития нанотехнологий это неприемлемо.

Традиционный метод передачи единицы длины в субмикронном диапазоне – лазерная интерферометрия. Однако перспективы создания основ метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне связывают с применением метода РЭМ. Методы и средства для воспроизведения и передачи размера единицы длины разработаны и исследованы. В настоящее время разрабатывается Государственная поверочная схема для средств измерений длины в нанометровом диапазоне. Разрабатываются и вводятся в действие национальные стандарты системы ГСОЕИ, например, ГОСТ Р 8.628-2007 и ГОСТ Р 8.629-2007 с требованиями к рельефным мерам и методам их поверки, ГОСТ Р 8.630-2007 и ГОСТ 8.631-2007 по методам поверки измерительных электронных растровых и сканирующих зондовых атомно-силовых микроскопов.

Оптическая микроскопия

Оптический микроскоп в настоящее время является основным средством контроля линейных размеров в микроэлектронике. К достоинствам оптических микроскопов относят: простоту, надежность, слабое влияние на объект исследований, оперативность получения результата, относительно невысокая стоимость. Современный оптический микроскоп – это высоко автоматизированный измерительный инструмент. Погрешность измерений в некоторых исследованиях достигает сотых долей микрометра. Однако этого уже недостаточно для

контроля линейных размеров элементов топологии современных интегральных микросхем. Недостаточное разрешение, уменьшение глубины резкости с увеличением апертуры, влияние особенностей освещения и отражения света от исследуемой поверхности на наблюдаемое изображение – это основные причины ограниченного применения оптической микроскопии в исследованиях микро и нано объектов.

Фундаментальным ограничением применения оптических микроскопов в нанотехнологиях является длина волны света. Длина волны в условно определенных диапазонах находится в пределах:

ультрафиолет 10 – 380 нм;

видимый свет 380 – 770 нм;

инфракрасный диапазон 0,77 – 340 мкм.

Монохроматическая оптическая размеромерия

В оптических приборах с лазерным источником света применяются те же методы измерений, что и в традиционной оптике. Длины волн излучения газовых и твердотельных лазеров находятся в диапазоне от долей микрометра до примерно 10 мкм (СО₂ – лазер). При исследовании малых объектов очень важно, чтобы излучение прибора минимально воздействовало на образец, поскольку нагрев, эмиссия, поверхностная диффузия и другие процессы, инициируемые излучением, меняют состояние исследуемого образца. В целом, поглощение монохроматического лазерного излучения различными материалами возрастает по мере уменьшения длины волны. Это не очень хорошо, так как с уменьшением длины волны увеличивается разрешение. В конце – концов, это и определяет чувствительность метода.

Лазерная сканирующая микроскопия

В приборах, основанных на конфокальной лазерной сканирующей микроскопии, контролируемый объект сканируется сфокусированным лазерным пучком. Световой пучок лазера, последовательно проходит: точечную диафрагму, полупрозрачное зеркало, блок сканирования, микрообъектив, создает на поверхности объекта изображение отверстия диафрагмы, затем, отразившись от

нее и от полупрозрачного зеркала и изменив направление, попадает на вторую точечную диафрагму, расположенную перед фотоприемником. Отклонение плоскости объекта от фокальной приводит к снижению уровня сигнала на фотоприемнике. Контролируемым перемещением плоскости объекта восстанавливается ее расположение в фокусе объектива и прежний уровень сигнала в фотоприемнике. Задаваемое плоскости объекта перемещение фиксируется. Разрешение основанного на этом методе прибора при длине волны лазерного излучения 0,486 мкм составляет 0,2 мкм (200 нм). Система сканирования позволяет снимать профиль поверхности объекта и тем самым восстанавливать ее трехмерное изображение.

Лазерная интерферометрия

В интерферометрии линейный размер, расстояние или перемещение определяются по количеству интерференционных полос. Различают 4 варианта интерференционного метода:

- гомодинный;
- гетеродинный;
- поляризационный;
- с обратной связью.

В гомодинном интерферометре пучок расщепляется на светоделителе, часть пучка отражается от объекта и интерферирует с частью пучка, отражающегося от опорной пластины (зеркала). Двухлучевой интерферометр известен как интерферометр Майкельсона. Прост, надежен, но на низких частотах обладает высоким уровнем шумов (до 0,02 нм). Применение волоконной оптики снизило шум в полосе частот от 0 до 1 кГц до 0,01 нм.

В гетеродинном интерферометре сдвинутая по частоте часть пучка, сформированного высокочастотным модулятором, интерферирует со сдвинутой по фазе частью пучка, отражающейся от объекта. Гетеродинный интерферометр сложнее, однако, его шум значительно ниже теплового, составляющего обычно 0,01 нм/Гц.

Достигаемое в интерференционных микроскопах разрешение по вертикали составляет 30 нм.

В поляризационном методе формируются два пучка с взаимно перпендикулярной поляризацией - опорный и измерительный. Относительная фаза этих пучков после отражения служит мерой перемещения объекта. В этом методе мало влияние флуктуаций длины оптического пути и интенсивности лазера. Общий шум в полосе 1 Гц – 20 кГц составляет 0,001 нм. В применяемых при производстве элементов микроэлектроники поляризационных интерферометрах вертикальное разрешение достигает 0,2 нм.

В системах с диодным *GaAlAs*-лазером и обратной связью перемещение объекта детектируется встроенным фотодиодом, который измеряет изменения интенсивности внутри резонатора, обусловленные взаимодействием отраженной части пучка с активной средой. чувствительность метода по шуму – 0,003 нм/Гц.

В лазерной оптике применяют также метод триангуляции. Перемещение объекта регистрируется по смещению на светоприемнике пятна, отраженного от объекта (зеркала, установленного на объекте). Порог обнаружения отклонения объекта ограничивается дробовым шумом из-за флуктуации длины оптического пути в среде и составляет $4 \cdot 10^{-5}$ нм/Гц.

Лазерная дифрактометрия

В лазерном дифрактометре размер определяется по параметрам дифракционного спектра, возникающего при освещении одного или нескольких элементов в виде дифракционной решетки пучком когерентного света. Измеряется интенсивность главных интерференционных максимумов, по которым восстанавливается профиль исследуемой периодической структуры или, так называемых, тест-объектов. Погрешность метода для объектов размерами от 0,4 до 20 мкм может достигать 0,1 – 0,3 мкм. Следует подчеркнуть, что восстановление структур возможно (и корректно) лишь при условии, что известны общий вид и форма элементов топологии.

Сканирующая микроскопия ближнего поля (СМБП)

Метод СМБП позволяет существенно улучшить характеристики разрешения оптических методов. Он заключается в следующем: зондирующий пучок проходит диафрагму, размер которой меньше длины волны излучения. Пройдя диафрагму пучок отражается от поверхности, находящейся от плоскости диафрагмы на расстоянии меньше половины длины волны. Этот отраженный пучок регистрируется чувствительным фотоприемником. При исчезновении сигнала на приемнике, инициируется процесс вертикального сканирования до восстановления прежнего уровня сигнала. По принципу действия метод СМБП, являющийся по сути оптическим, тем не менее, близок к методам СТМ и АСМ, рассмотренным ниже. Методом СМБП могут определяться элементы размерами от 20 нм.

Достоинства метода СМБП заключаются в отсутствии вредного влияния эффектов интерференции и дифракции света на четкость границ, в допустимости работы с относительно толстыми элементами микрообъектов.

Достоинства СМБП снижает его чувствительность к оптическим характеристикам поверхности, длине волны, люминесценции и др.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ)

Измерение размеров по методу РЭМ основано на применении электронного микроскопа в качестве компаратора (как и в традиционных оптических микроскопах). Для определения увеличения, без которого невозможно измерение размеров, применяют эталонные меры субмикронных размеров. Эталонной мерой может служить длина волны лазерного излучения (*He-Ne* – лазер), воспроизводимая в лазерных интерферометрических системах. В этом случае погрешность измерений может быть снижена до 0,1 нм, тогда как разрешение РЭМ достигает лишь 10 нм. Предлагаемые на рынке системы измерения линейных размеров на базе РЭМ позволяют производить измерения в диапазоне от 100 нм до 500 мкм. В измерениях линейных размеров, проводимых в научных исследованиях и при производстве элементов микроэлектроники, методом РЭМ погрешность обычно составляет несколько нанометров и зависит от диаметра электронного зонда и ускоряющего напряжения.

К недостаткам метода РЭМ относят:

- субмикронный уровень разрешения;
- сложность получения трехмерного изображения (особенности проникновения первичных электронов в поверхностные слои материалов);
- влияния накопления заряда на плохо проводящих поверхностях;
- необходимость создания и поддержания высокого вакуума;
- влияние высокоэнергетических сфокусированных пучков электронов на исследуемую поверхность объекта.

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ)

Предельные значения разрешения при измерении линейных размеров в нано и субнанометровом диапазонах достигаются в методах СЗМ.

Отличительной особенностью СЗМ является наличие сканирующего зонда, повторяющего профиль поверхности исследуемого образца. Существует несколько вариантов реализации метода СЗМ: сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия.

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)

Метод СТМ основан на квантовом эффекте туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между исследуемой поверхностью и острием микрозонда. Острие зонда с помощью позиционера приближается к исследуемой поверхности до появления туннельного тока. При расстоянии между острием зонда и поверхностью (два электрода) около 1 нм величина тока составляет 1 – 10 нА при разности потенциалов между электродами 0,1 - 1 В. При перемещении зонда по нормали к поверхности на 0,1 нм туннельный ток уменьшается примерно в 10 раз. С помощью обратной связи, воздействующей на пьезоэлемент, на котором закреплено острие зонда, поддерживается постоянное значение туннельного тока. Тогда, в соответствии с изменениями рельефа, меняется и напряжение на управляющем пьезоэлементе. Это напряжение и представляет собой информативный сигнал, характеризующий топографию поверхности, если вариации работы выхода электронов по поверхности объекта незначительны. Разрешение в методе СТМ по вертикали составляет менее 0,01

нм, а по горизонтали – около 0,1 нм. В туннельном промежутке СТМ либо должен поддерживаться вакуум, либо находиться диэлектрическая среда.

К достоинствам СТМ относят:

- неразрушающий характер измерений;
- необязательность создания и поддержания высокого вакуума;
- относительная быстрота получения изображения поверхности на атомном уровне разрешения;
- возможность работы в широком диапазоне температур.

Основной недостаток СТМ – исследуемая поверхность должна быть электропроводной.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

Метод АСМ основан на эффекте силового взаимодействия между близко расположенными твердыми телами. Важнейшим элементом АСМ является микрозонд (кантилевер), на конце которого располагается диэлектрическое острие (кремний), к которому с помощью трехкоординатного манипулятора подводится поверхность исследуемого образца на расстояние 1 – 10 нм. Острие кантилевера закреплено на пружине малой жесткости, выполненной в виде упругой балки. Межатомное (межмолекулярное) взаимодействие приводит к отклонению острия и изгибу балки. Перемещение острия преобразуется в выходной электрический сигнал емкостными, лазерными или другими датчиками, в том числе, основанными на туннельном эффекте. Манипулятор, с помощью системы обратной связи, перемещает образец до тех пор, пока не восстановится исходное положение кантилевера, что соответствует постоянству силы взаимодействия острия и поверхности образца. Координаты острия фиксируются для восстановления изображения исследуемой поверхности.

Разрешение АСМ по вертикали сравнимо с разрешением СТМ. Разрешение АСМ по горизонтали зависит от расстояния между острием и поверхностью и от радиуса кривизны острия кантилевера. При расстоянии около 0,4 нм и радиусе кривизны 0,5 нм продольное разрешение АСМ оценивается (расчетно) примерно в 1 нм. В настоящее время существуют конструкции зондов в ви-

де тонких нитевидных волокон и еще более тонких нанотрубок с радиусом кривизны менее 10 нм.

К недостаткам метода АСМ относят некоторые его ограничения:

- максимальная глубина профиля не должна превышать 100 нм;
- соседние элементы профиля должны быть расположены на расстоянии более 100 нм;
- геометрия острия зонда сказывается на геометрии восстанавливаемого профиля;
- для определения аппаратной функции прибора требуется наличие эталонной структуры рельефа с известным профилем и размером элемента.

Помимо рекордного разрешения, к достоинствам метода АСМ относится возможность его реализации на проводящих и непроводящих материалах, в вакууме, воздухе и в жидкой среде.

Работы по совершенствованию методов измерений линейных размеров в субмикрометровом и нанометровом диапазонах продолжают в различных странах: разрабатываются методы и приборы фазово-компьютерной, интерференционно – когерентной микроскопии и др.

5.2. Тенденции развития измерительной техники: микро и нано измерения, современные датчики и сенсоры

Актуальными областями совершенствования и создания новых средств измерений, основанных на новых физических принципах и на современных технологиях и материалах, являются:

- безопасность и защита информации;
- экологическая безопасность и охрана окружающей среды;
- здравоохранение и диагностика;
- метрологическое обеспечение инновационных технологий;
- развитие эталонной базы единиц величин, стандартных образцов свойств и состава вещества;

- совершенствование системы единиц физических величин и их переопределение.

Основные направления развития современных преобразователей физических величин:

- миниатюризация;
- микро и нано электроника;
- наноматериалы в сенсорах;
- хемосенсоры и внутрисполостные зонды;
- интеллектуальные датчики и системы.

Новые материалы для микродатчиков

Перспективы развития микро и нано электроники в значительной мере связываются, как и ранее, с керамическими материалами. Если иметь в виду функциональную керамику (не для целей электрической изоляции), то для электроники важны:

- Полупроводниковые керамики. Для подложек интегральных микросхем перспективным является диэлектрик $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.
- Керамика с магнитными свойствами – ферриты на основе оксида железа и феррито образующих элементов. Это соединения типа: $A_xB_yFe_nO_m$.
- Керамика с оптическими свойствами на основе кремния.
- Керамика с химическими функциями на основе пористых материалов – сорбентов.
- Нанокристаллическая керамика (размер зерна менее 100 нм).

В наноматериалах отношение объема границ к объему материала значительно выше, чем в обычных макроструктурах и доля объема границ к общему объему материала может достигать 80%. Чем больше поверхность, тем больше свободная энергия Гиббса и тем, следовательно, более неравновесной является структура материала. В этих условиях могут проявляться свойства, не характерные для поведения обычного материала.

В качестве перспективных материалов для замещения активных элементов современной полупроводниковой электроники рассматриваются углеродные нанотрубки (УН). В них могут быть реализованы различные типы проводимости, включая полупроводниковый тип. Эта проводимость может модулироваться в поперечном электрическом поле.

Создание элементной базы электроники, в первую очередь, специальной, возможно целиком на углеродной основе благодаря уникальным свойствам углеродных нанотрубок: структура УН близка к структуре алмаза; легирование значительно меняет свойства проводимости; в качестве подложки для УН также может быть использован углерод; УН могут обладать металлической проводимостью и служить в качестве проводников; на углероде возможно формирование интегральных структур.

Уже в 1998 году специалисты IBM продемонстрировали образец транзистора на основе пучка УН (рис. 5. 3).

Разрабатываются нанокompозитные материалы – молекулярные композиты, от которых ожидают проявления уникальных свойств – минимальной дефектности, повышенной прочности и др.

Активно исследуются возможности создания миниатюрных преобразователей на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния, например, для измерения давления и деформаций в композиционных материалах, а также температуры и скорости газожидкостных потоков.

Наиболее замечательной особенностью НК является то, что они представляют собой самую прочную форму из всех известных разновидностей твердого тела. Полупроводниковые преобразователи на основе НК обладают высокой тензочувствительностью и малыми габаритами. Структура НК совершенна, а физические свойства приближаются к теоретически рассчитанным для идеальной кристаллической решетки. Все это создает условия для непосредственного использования НК в качестве преобразователей высокочувствительных, миниатюрных и малоинерционных датчиков.

Расширяется применение пьезоэлектрических полимерных пленок: поливинилиденфторид (PVDF) - фторопласт. Пьезорезистивные полимеры имеют толщину 0,25 мм и менее. Их отличает очень большая тензочувствительность - сопротивление меняется на 3 порядка при изменении нагрузки от 0 до 30 Н. Однако, точность низкая – относительная погрешность около 10%.

Химические сенсоры

Химический сенсор (ХС) состоит из химического селективного слоя датчика, дающего отклик на присутствие определяемого компонента и изменение его содержания, и физического преобразователя. Последний преобразует энергию, возникающую в ходе реакции селективного слоя с определяемым компонентом, в электрический или световой сигнал, который затем измеряется с помощью светочувствительного и/или электронного устройства. Этот сигнал и является аналитическим, поскольку дает прямую информацию о составе анализируемой среды. ХС могут работать на принципах химических реакций, когда аналитический сигнал возникает вследствие химического взаимодействия определяемого компонента с чувствительным слоем, или на физических принципах, когда измеряется физический параметр (поглощение или отражение света, масса, проводимость). В первом случае чувствительный слой выполняет функцию химического преобразователя.

Для повышения избирательности на входном устройстве ХС (перед химически чувствительным слоем) могут размещаться мембраны, селективно пропускающие частицы определяемого компонента: ионообменные, диализные (разделение молекул в коллоидных растворах на полупроницаемых пленках), гидрофобные и др. В этом случае определяемое вещество диффундирует через полупроницаемую мембрану к тонкому слою химического преобразователя, в котором формируется аналитический сигнал на данный компонент. На основе ХС конструируют сенсорные анализаторы - приборы, предназначенные для определения какого-либо вещества в заданном диапазоне его концентраций.

В зависимости от характера отклика (первичного сигнала), возникающего в чувствительном слое ХС, последние подразделяют на различные типы. В настоящее время наибольшее распространение получили *электрохимические ХС*, и прежде всего *амперометрические* и *потенциометрические*, однако применяются и другие типы ХС, в том числе и *оптические*.

Электрохимические сенсоры

В электрохимических сенсорах (ЭХС) определяемый компонент реагирует с чувствительным слоем непосредственно на электроде или в объеме слоя раствора около электрода.

Среди ЭХС получили распространение миниатюрные устройства, основанные на полевых транзисторах (МОП-транзисторы). В них металлический контакт затвора транзистора заменен химически чувствительным слоем и электродом сравнения. В этом случае затвор представляет собой металлический слой, покрытый чувствительным материалом. Взаимодействие определяемого компонента с материалом затвора вызывает изменение электрического поля в области затвора и, следовательно, порогового потенциала и тока в транзисторе, что и обуславливает аналитический сигнал. Эти устройства чувствительны к некоторым газам, например: H_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S , с пределом обнаружения до 10^{-4} - 10^{-5} %.

Оптические и оптоволоконные сенсоры

Оптические ХС работают на принципах поглощения света, или отражения первичного светового потока, или возникающей люминесценции. Эти сенсоры выгодно отличаются от ЭХС тем, что нечувствительны к электромагнитным и радиационным полям и способны передавать аналитический сигнал без искажения на большие расстояния. Кроме того, они имеют невысокую стоимость по сравнению с ЭХС и могут конкурировать с ними, особенно в случаях, когда применение ЭХС неэффективно. Из оптических ХС наиболее перспективны сенсоры на основе волоконной оптики.

В волоконно-оптических сенсорах (ВОС) на торце световода закрепляется (иммобилизуется) реагент содержащая фаза (РСФ). При описании таких устройств иногда используют термин «оптрод», являющийся комбинацией слов «оптика» и «электрод». Этим подчеркивается, что ВОС по своему назначению близок к электродам, в том числе и к тем, на основе которых функционируют ЭХС. Однако по природе сигнала и механизму отклика они совершенно отличны. Характеристика материала световода определяет оптический диапазон и соответственно аналитические возможности всего устройства. Если оптическое волокно изготовлено из кварца, то такой оптрод работает в широкой области спектра, включая ультрафиолетовую его часть. Для стекловолокна область длин волн охватывает лишь видимую область спектра. Если оптоволокно изготовлено из полимерного материала (такие устройства имеют невысокую стоимость), то диапазон длин волн, в котором работает ВОС, находится в области длин волн более 450 нм.

Оптосенсоры могут быть обратимыми и необратимыми. Сенсор обратим, если РСФ не разрушается при ее взаимодействии с определяемым веществом. Если часть реагента потребляется в ходе определения, сенсор работает необратимо.

Электрические и пьезоэлектрические сенсоры

Из других типов ХС следует упомянуть электрические (ЭС) и сенсоры, основанные на принципах пьезоэффекта. При конструировании ЭС на поверхность преобразователя-полупроводника наносится адсорбционный слой специального материала, дающий отклик на присутствие определяемого компонента. Для изготовления полупроводниковой части этих ЭС используют различные оксиды металлов (SnO_2 , In_2O_3 , Nb_2O_5 - в ЭС на оксид углерода и аммиак).

Принцип действия таких ХС основан на изменении их электрической проводимости в присутствии молекул определяемого газа. В воздухе на нагретой поверхности оксидного полупроводникового материала происходит хемосорбция молекул кислорода. При этом образуются отрицательно заряженные

ионы O_2 с локализацией на них электронов из зоны проводимости полупроводника. Предполагается, что электропроводность полупроводникового слоя в воздухе определяется степенью заполнения поверхности хемосорбированным кислородом. В присутствии определяемого газа на поверхности полупроводника происходит окисление молекул этого газа. При этом степень заполнения поверхности молекулами кислорода изменяется пропорционально концентрации определяемого газа. Введением в композицию металлоксидных сенсоров легирующих добавок добиваются высокой селективности отклика. Например, легирование оксида олова платиновой или палладиевой чернью заметно повышает чувствительность сенсора к парам этанола. Эти сенсоры могут быть изготовлены по технологии микросхем, когда чувствительный слой формируется на одном кристалле вместе с электрической цепью усилителя и детектора, что позволяет обрабатывать аналитический сигнал сенсора непосредственно в месте его возникновения. Существуют подобные ЭС на O_2 , NO_x , H_2S , CO , H_2 и углеводороды, позволяющие определять их содержание на уровне 10^{-5} %.

Датчики на основе нитевидных кристаллов кремния

Миниатюрный датчик давления предназначен для измерения давления окружающей среды и используется в новой технике и информационных системах, в частности для измерения глубины погружения в жидкость, высоты подъёма над поверхностью Земли, быстропротекающих процессов, скорости пульсаций давления и др.

В датчике использован корпус стандартной микросхемы и заводская технология заключительных стадий сборки и контроля герметичности. При создании датчика использованы оригинальные способы и методики наклейки НК на упругий элемент, полимеризации связующего, напыления металлических контактных площадок и их последующего вжигания, создания низкоомных контактов и их формовки, выполненные на уровне изобретений. НК $p - Si <111>$ с 4-6 омическими контактами наклеен на металлическую мембрану, в качестве которой служит крышка промышленного корпуса микросхемы 401.14-1, либо в том

же корпусе в качестве основания использовалась керамическая мембрана. 4-6 контактов в НК образуют розетку из 3-5 тензорезисторов. Это создает условия для расширения функциональных возможностей, улучшения метрологических характеристик и повышения надежности датчика. В зоне его расположения можно измерять давление, температуру, ее разность и градиент. При разрушении одного или нескольких тензорезисторов датчик остается работоспособным, что обеспечивает его высокую надежность.

Керамическое основание и герметично присоединенные крышки образуют замкнутый объем с некоторым постоянным давлением газа. Изменение давления окружающей датчик внешней среды приводит к прогибу мембраны с наклеенным на нее НК. При этом тензорезистор претерпевает деформацию растяжения и его сопротивление изменяется. Падение напряжения на тензорезисторе пропорционально давлению с нелинейностью преобразования $\sim 10^{-3}$. Далее падение напряжения регистрируется в виде аналогового сигнала либо преобразуется в частоту.

Микродатчик малых линейных перемещений на основе резонатора Фабри-Перо

Резонатор Фабри-Перо является по существу частотным фильтром. Разница частот пиков выходящего света равна: $\Delta f = c/2l$. При $l = 1$ мкм $\Delta f = (0,5 - 1)$ ГГц. Воздействующая величина (давление, перемещение, сила) изменяют расстояние между зеркалами и, следовательно, величину Δf . В датчике по рис. 5.4 в) отраженный свет попадает на линзу, клиновидную призму и в определенную точку поверхности ПЧД. Для ПЧД по рис. 5.4 г) это означает изменение силы тока:

$I_A = I_0(R_{AB} - R_X)/R_{AB}$, $I_B = I_0 R_X/R_{AB}$. Значение сопротивления R_X пропорционально расстоянию X .

На основе ПЧД могут создаваться миниатюрные системы измерения малых перемещений методом триангуляции (рис. 5.5) и др. методами (рис. 5.6, 5.7).

Удаление объекта от конца световода уменьшает долю отраженных лучей, попадающих в световод. Изменение интенсивности отраженного света служит параметром, характеризующим величину перемещения.

Интерференционный датчик температуры

Луч по волноводу (рис. 5.8) доходит до границы раздела фаз и частично отражается, а частично проходит далее и на следующей границе раздела фаз вновь отражается. При изменении температуры меняется коэффициент преломления в чувствительной к температуре «пробке» световода. В результате, для каждой температуры прямой и отраженный лучи образуют разную интерференционную картину. С торца преобразователь защищен от коррозионного воздействия покрытием из *FeCrAl*.

Оптоволоконный преобразователь силы/деформации (рис. 5.9).

При изгибе оптоволоконна ухудшаются условия полного внутреннего отражения, так как угол падения на внутреннюю поверхность световода становится меньше угла полного отражения. Изменение интенсивности проходящего света определяется степенью изгиба оптоволоконна, которая зависит от приложенного усилия.

Тепловой микрорасходомер газа

На резистор (термопара) (рис. 5.10) подается электрическое напряжение такое, чтобы поддерживать один и тот же тепловой режим между холодным и горячим спаями термопары. Изменение этого напряжения зависят от скорости потока газа:

$$\Delta U = \text{const} \left(\frac{1}{\sqrt{\mu^2 + 1}} - 1 \right)$$
$$\mu = \frac{l\nu\rho C_p}{2\pi\lambda_g},$$

где: l – длина балки; λ_g – теплопроводность газа; ρ – плотность газа; ν – скорость потока; C_p – теплоемкость газа при постоянном давлении.

Ёмкостной микрорасходомер

Средняя скорость потока v в микрорасходомере, как и в традиционных расходомерах, пропорциональна разнице давлений $(P_1 - P_2)$ в степени $\frac{1}{2}$ (рис. 5.11).

5.3. Интеллектуальные датчики

Ранее существовала практика передачи сигналов от распределённых датчиков к центральному контроллеру. Контроллер был снабжён значительным количеством каналов ввода сигналов различного типа, имел значительные габариты, стоимость и монтировался в специальных шкафах в машинных залах. Длина кабельных трасс достигала 100-1000 метров, количество проводов измерялось тысячами.

Однако, развитие электронной элементной базы и полевых шин и, в первую очередь, широкое распространение микроконтроллеров, способствовало переходу к производству *интеллектуальных* первичных преобразователей. Датчики и исполнительные механизмы этого типа способны к самостоятельной обработке информации и могут включаться в информационно-управляющие сети практически независимо от их масштаба, структуры и назначения.

Возможности реализации новых стратегий в практике автоматизации ИИС связаны с применением миниатюрной и мало потребляющей микроэлектронной элементной базы, позволяющей встраивать специализированные контроллеры непосредственно в первичные преобразователи.

Основой встраиваемого в первичный преобразователь *интеллекта* является микроконтроллер. Это чип, содержащий большинство необходимых ресурсов, связанных с вводом, выводом и программной обработкой небольшого количества сигналов и поддержкой протоколов промышленных сетей связи (полевых шин). Широта номенклатуры, габариты, промышленные климатические исполнения, вычислительные возможности 8-и и 16- разрядных микрокон-

троллеров и их цена позволяют существенно сократить количество элементов в аппаратуре, снизить потребление, уменьшить габариты и увеличить надежность, обеспечить помехоустойчивость передачи информации на произвольные расстояния.

Применение микроконтроллеров обеспечивает настолько принципиальное повышение потребительских свойств продукции при столь низкой стоимости аппаратуры самого контроллера, что для рассматриваемого класса устройств альтернативной элементной базы просто нет.

Благодаря минимизации и унификации аппаратной обработки сигналов и акценту на его оцифровку и программную обработку, на аппаратном уровне схема встраиваемого контроллера сводится практически к «одному чипу», что, с одной стороны, приближает надёжность устройства к надёжности одного чипа, а с другой стороны, позволяет прямо в датчике реализовать все вычисления, связанные с его назначением.

Основные преимущества применения микроконтроллеров:

- адаптивность устройств: возможность загрузки по каналу связи и энергонезависимое хранение в памяти микроконтроллера градуировочных характеристик сенсорного элемента и др. параметров, используемых при вычислениях;
- взаимозаменяемость устройств: программная компенсация уникальности сенсорного элемента с расчётом измеряемых физических величин в стандартных физических единицах (например, расхода и объёма у расходомера) с учётом возможных параметров влияния (значения которых передаются в датчик по каналу связи);
- метрологические характеристики (МХ) системы определяется только МХ первичных преобразователей, влияние МХ каналов внешних устройств (вторичных блоков, контроллеров) как и сами эти каналы – исключается;
- возможность улучшения МХ преобразователя путем внутренней программной корректировки и селекции сенсоров при производстве;

- возможность расширения диапазона измерений, особенно в область слабых сигналов, при одновременном повышении помехоустойчивости благодаря возможностям программной фильтрации, коррекции и компенсации;
- возможность (в ряде случаев) упрощения конструкции датчика с акцентом на программную настройку и компенсацию;
- возможность исполнения «интеллекта» с низким потреблением, позволяющим:
 - поддерживать функции датчика при кратковременных пропаданиях питания, использовать для питания линию связи (с подсоединением по 2 проводам, что означает возможность работы с существующим кабельным хозяйством действующего объекта, построенного с применением пассивных 2-х проводных датчиков);
 - реализовать контроллеры с типом взрывозащиты «искробезопасная цепь», позволяющих реорганизовать построение систем для взрывоопасных производств;
 - ведение трендов измеряемых параметров и архивация событий (таких, как отключение питания и пр.) в датчике для анализа аварийных ситуаций и диагностики;
 - лёгкость модернизации: разработчик может менять начинку преобразователя (даже сменить физический принцип или объединить несколько сенсорных методов) прозрачно для всей системы при сохранении структуры выходной информации датчика;
 - возможность полной автономности сети интеллектуальных преобразователей, благодаря возможности передачи функций управления в преобразователи;
 - снижение требований к пропускной способности каналов связи благодаря переносу в устройство функций, соответствующих его назначению и снижению пересылок необработанной информации «в центр», исключение проблемы «узкого места», связанной с наличием центральных элементов системы.

Встроенный контроллер обеспечивает двунаправленную передачу информации в цифровой форме по унифицированному многоточечному каналу

связи – полевой шине. Полевая шина сама по себе обеспечивает переход на новый уровень надёжности всей системы в целом при существенном снижении себестоимости, включая:

- помехоустойчивость передачи информации на большие расстояния в условиях индустриальной среды и слабую чувствительность к качеству канала;
- возможность соединять множество устройств, в том числе различного назначения, в произвольной конфигурации одним каналом связи;
- существенное сокращение ненадёжных элементов (провода, клеммники);
- существенное сокращение документации и работы по монтажу и поддержке системы;
- простоту и низкую стоимость гальванической развязки удалённых частей системы, обеспечивающей метрологическое качество и просто надёжность функционирования этих частей;
- возможность замены устройств без вывода из эксплуатации;
- простоту и низкую стоимость организации искрозащиты в одном общем канале связи для работы группы преобразователей во взрывоопасной среде;
- низкие затраты и гибкость построения схем резервирования и дублирования;
- возможность дистанционного (без извлечения из системы) диагностирования, изменения параметров настройки и перепрограммирования устройства;
- возможность передачи датчику информации по влияющим величинам для коррекции результатов измерений в реальном масштабе времени;
- обеспечение единых инструментальных средств тестирования, мониторинга и обслуживания всех устройств через общий унифицированный канал связи без выведения устройств из работающей системы;
- существенное снижение требований к верхнему уровню системы;
- снимается необходимость применения промышленного контроллера в специализированной конфигурации для взаимодействия с датчиками: достаточно контроллера в простейшей комплектации – с каналом связи и без каналов измерения;

- сеть датчиков может быть подключена к обычному компьютеру или операторской панели через недорогой преобразователь.

На потребительском уровне указанные преимущества в совокупности обеспечивают:

- возможность применения интеллектуальных преобразователей как деталей простого и удобного конструктора для лёгкой компоновки надёжных систем автоматизации произвольного назначения и масштаба;
- снижение себестоимости применения таких устройств, включая затраты на развёртывание, обслуживание и развитие систем на их основе;
- снижение себестоимости производства преобразователей, включая увеличение выпуска годной продукции, расширение сортамента;
- высокую привлекательность по уровню выходных технических характеристик.

Библиографический список

Нормативная документация:

1. ГОСТ 8.001-80 ГСИ. Государственные испытания средств измерений.
2. ГОСТ 8.061-80.ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.
3. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
4. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84. Издательство стандартов,1988.
5. ГОСТ 8.207-76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
6. ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
7. ГОСТ Р 8.565-96 ГСИ. Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций. Основные положения.

8. ГОСТ 8.417-82 ГСИ. Единицы физических величин.
9. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
10. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике.
11. МИ 1552-86 ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений.
12. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
13. МИ 2091-90 ГСИ. Измерения физических величин. Общие требования.
14. МИ 2247-93 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
15. МИ 2552-99 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
16. ПР 50.2.002-94 ГСИ. Порядок осуществления государственного метрологического надзора за выпуском, состоянием и применением средств измерений.
17. ПР 50.2.006-94 ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.
18. ПР 50.2.016-94 ГСИ. Российская система калибровки. Требования к выполнению калибровочных работ.
19. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
20. Руководство по выражению неопределенности измерения. ВНИИМ. С.Пб.1999.
21. ГОСТ Р ИСО 9000-2001 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

Техническая литература:

1. Количественный анализ хроматографическими методами. Под ред. Э. Кец. Пер. с англ. М.: МИР, 1990.
2. Деньгуб В.М., Смирнов В.Г. Единицы величин. Словарь-справочник. М.: Издательство стандартов, 1990.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. М.: Наука, 1988.
6. Н. Preston-Thomas. The international temperature scale of 1990 (ITS-90). Metrologia, No 27, p. 3-10, 1990.
7. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия.1968.
8. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. Методы измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
9. Аш К Датчики измерительных систем: в 2 кн. М.: Мир, 1992.
10. Измерения в промышленности. Справочник в 3 кн. Под ред. П. Профоса. М.: Металлургия, 1990.
11. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
12. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров. М.: Мир, 1989.
13. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. Учебное пособие. М.: Логос, 2001.
14. Проектирование датчиков для измерения технических величин. Под общ. ред. Б.П.Осадчего. М.: Машиностроение, 1979.
15. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений. М.: Энергоатомиздат, 1986.

16. Харт Х. Введение в измерительную технику. М.: Мир, 1999.
17. Классен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М.: Постмаркет, 2000.
18. Кондрашов А.П. Шестопапов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. М.: Атомиздат, 1977.
19. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978.
22. Маркин Н.С., Ершов В.С. Метрология. Введение в специальность. М, Издательство стандартов, 1991.
23. Бошняк Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. М.: Машиностроение, 1974.
24. Датчики теплофизических и механических параметров. В 3-х кн. Под общ. ред. Ю.Н. Коптева. М.: Радиотехника, 1998.
25. Сулаберидзе В.Ш. Средства контроля условий испытаний материалов в экспериментах на исследовательских реакторах и в защитных камерах. Днепропетровск.: НИИАР, 1997.
26. Тиль Р. Электрические измерения неэлектрических величин. М.: Энергоатомиздат, 1987.
27. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника. М.: Высшая школа, 1991.
28. Хофманн Д. Техника измерений и обеспечение качества. М.: Энергоатомиздат, 1983.
29. Евтихийев Н.Н., Купершмидт Я.А., Папуловский В.Ф., Скугоров В.Н. Измерение электрических и неэлектрических величин. М.: Энергоатомиздат, 1990.
30. Бриндли К. Измерительные преобразователи. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1991.

31. Основы метрологии и электрические измерения. Под ред. Е.М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
32. Грабовски Б. Краткий справочник по электронике. М.: ДМКПресс, 2001.
33. Международные документы МОЗМ в области метрологии. Основные правила и положения. М.: РИЦ «ТД», 1993.
34. Справочное пособие по основам электротехники и электроники. Под ред. А.В.Нетушила. М.: Энергоатомиздат, 1997.
35. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
36. Малышев Е.К., Засадыч Ю.Б., Стабровский С.А. Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1991.
37. Мительман М.Г., Розенблюм Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1982.
38. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1990.
39. Боланд Дж. Приборы контроля ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1973.
40. Коляда В.М., Карасев В.С. калориметрия излучений ядерного реактора. М.: Атомиздат, 1974.
41. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1976.
42. Прохоров Ю.В., Рязанов Ю.А. Теория вероятностей. М.: Наука, 1973.
43. Лифиц И.М. Основы стандартизации, метрологии, сертификации: Учебник. М.: «Юрайт – М». 2001.
44. Клевлеев В.М., Кузнецова И.А., Попов Ю.П. Метрология, стандартизация и сертификация: Учебник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2003.
45. Сергеев А.Г., Латышев М.В. Сертификация: Учебное пособие. М.: Логос, 2000.

46. Большакова Г.А., Волкоморов В.И., Мурашёв Ю.Г. Основы стандартизации и метрологии: Учебное пособие. СПб.:БГТУ, 1995.
47. Кокорев В.И. Основы стандартизации в информационных системах. М.: Издательство стандартов, 1988.
48. Марков Н.Н. Взаимозаменяемость и технические измерения. М.: Издательство стандартов, 1983.
49. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Информационные технологии. М.: Высшая школа, 2005.
50. Борисов Ю.И. и др. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: ФОРУМ, 2007.
51. Анциферов С.С., Голубь Б.И. Общая теория измерений. М.: Горячая линия - Телеком, 2007.
52. Ким К.К и др. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. СПб.: ПИТЕР, 2006.
53. Бородько С.И. и др. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. М.: Горячая линия - Телеком, 2007.
54. Афонинский А.А. Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: Салон – Пресс, 2007.
55. Нефедов В.И. Метрология и радиоизмерения. М.: Высшая школа, 2006.
56. Аристов А.И. и др. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Издательский Центр Академия, 2006.
57. Бузов Б.А. Управление качеством продукции. Технический регламент, стандартизация и сертификация. М.: Академия, 2006.
58. Джексон Р.Г. Мир электроники. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007.
59. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. М.: Техносфера, 2006.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ.....
 - 1.1. Объекты измерений. Отношения, в которых физические объекты проявляют свои свойства.....
 - 1.2. Понятие о физической величине. Шкалы, единицы и системы единиц физических величин.....
 - 1.3. Передача, хранение, воспроизведение единицы ФВ, прослеживаемость измерений.....
 - 1.4. Понятие об измерении.....
 - 1.5. Понятие о неопределенности и погрешности измерения.....
2. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ИЗМЕРЕНИЙ.....
 - 2.1. Понятие о средстве измерений.....
 - 2.2. Виды и характеристики измерительных сигналов.....
 - 2.3. Измерительные цепи. Схемы формирования и преобразования сигнала....
 - 2.3.1. Цепь генераторного преобразователя.....
 - 2.3.2. Основные типы цепей параметрических преобразователей.....
 - 2.3.3. Согласование датчика с элементами измерительной цепи....
 - 2.4. Измерительная установка и измерительные информационные системы..
3. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....
 - 3.1. Измерение времени (временных интервалов).....
 - 3.2. Измерение состава вещества.....
 - 3.3. Измерение температуры.....
 - 3.3.1. Контактные методы измерения температуры.....
 - 3.3.2. Пирометрические методы измерения температуры.....
 - 3.3.3. Спектрометрические методы измерения температуры.....
 - 3.4. Измерение параметров переноса тепла.....
 - 3.5. Измерение параметров движения.....
 - 3.5.1. Измерение параметров вибрации.....
 - 3.5.2. Измерение расхода жидких и газообразных сред.....

3.6. Измерение линейных размеров.....	
3.6.1. Измерение линейных размеров и перемещений объектов.....	
3.6.2. Волновые методы измерения толщины.....	
3.6.3. Контактные методы измерения линейных перемещений (деформаций).....	
3.6.4. Измерение уровня.....	
3.7. Измерение усилий и давления.....	
3.7.1. Методы измерения силы и напряжения.....	
3.7.2. Методы измерения давления.....	
3.7.3. Методы измерения вакуума.....	
3.8. Измерение характеристик магнитных, электрических и электромагнитных излучений (ЭМИ).....	
3.8.1. Основные характеристики и классификация ЭМИ.....	
3.8.2. Источники ЭМП.....	
3.8.3. Методы и средства контроля МП.....	
3.9. Измерение характеристик ионизирующих излучений.....	
3.9.1. Сцинтилляционный метод.....	
3.9.2. Ионизационный метод.....	
3.9.3. Эмиссионный метод.....	
3.10. Электроизоляционные материалы датчиков.....	
4. МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ СИ.....	
5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ.....	
5.1. Метрологическое обеспечение нанотехнологий.....	
5.2. Тенденции развития измерительной техники: микро и нано измерения, современные датчики и сенсоры.....	
5.3. Интеллектуальные датчики.....	
<i>Библиографический список.....</i>	<i>170</i>

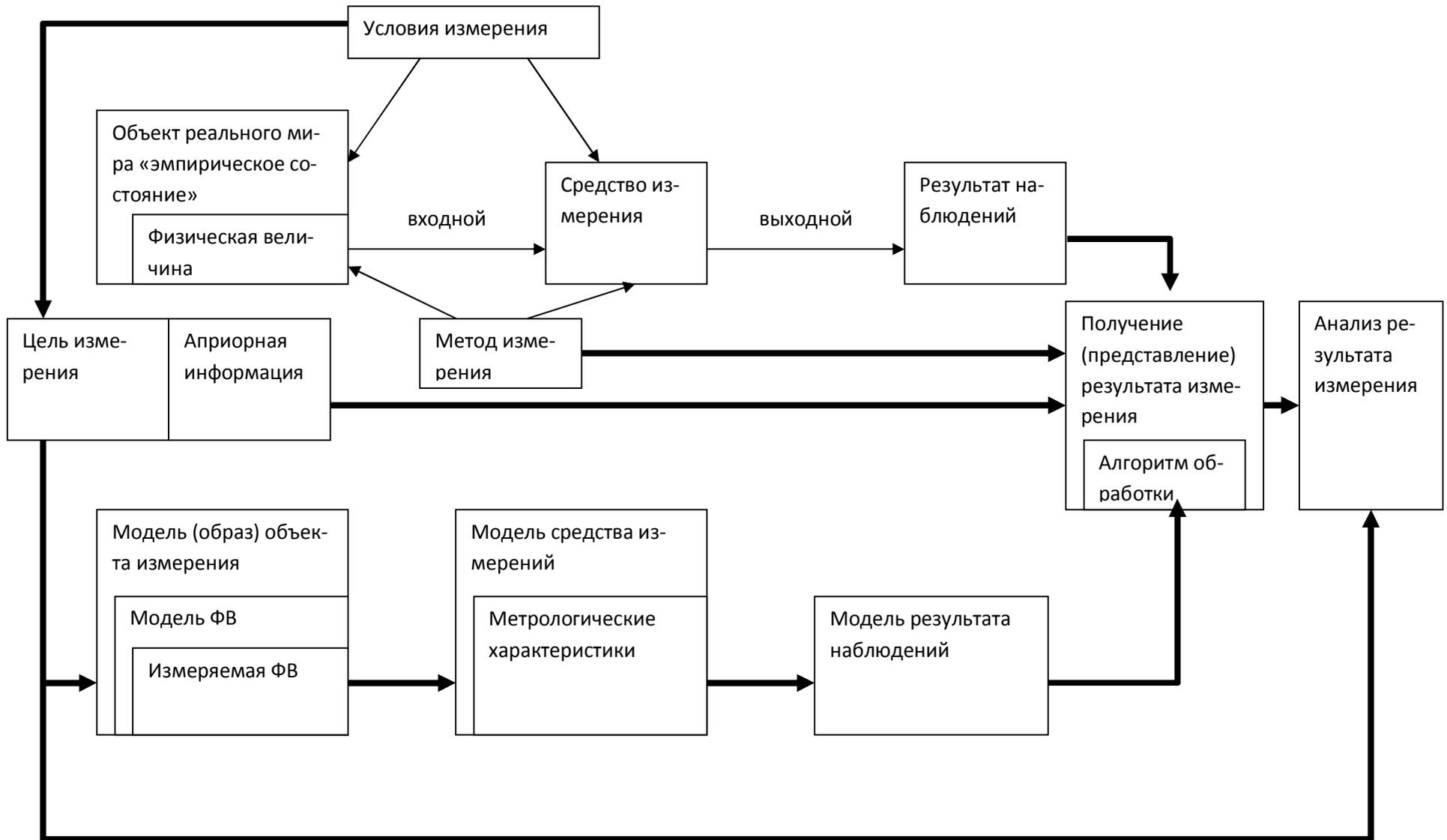


Рис. 1.1. Структурная схема измерения

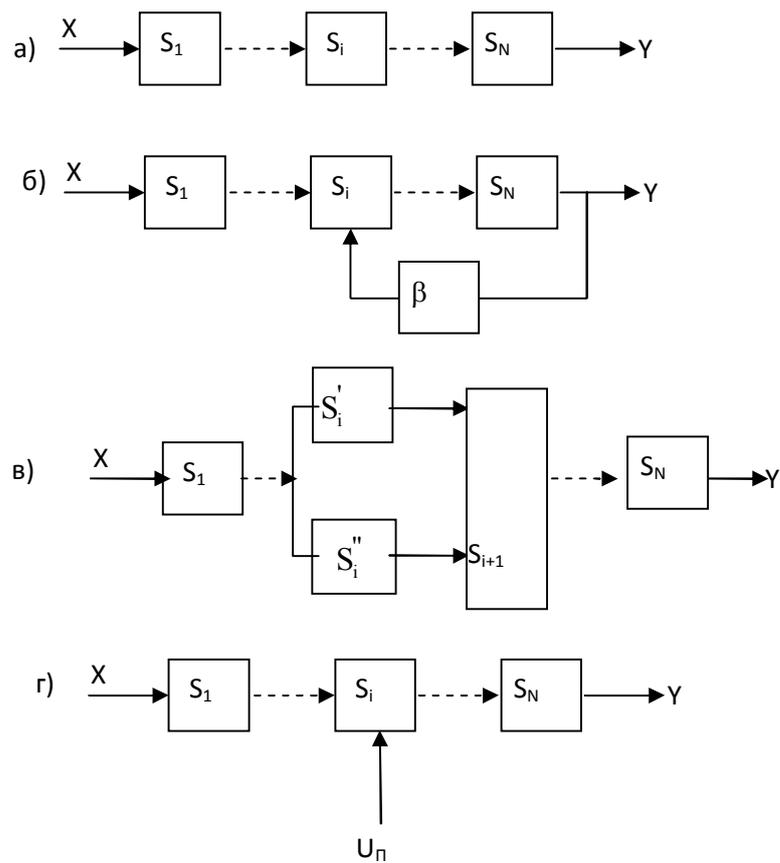


Рис. 2.1. Структурные схемы датчиков с несколькими последовательными преобразованиями: прямого (а) и уравнивающего (б) преобразования; разветвленная (в); параметрического датчика с внешним источником питания (г)

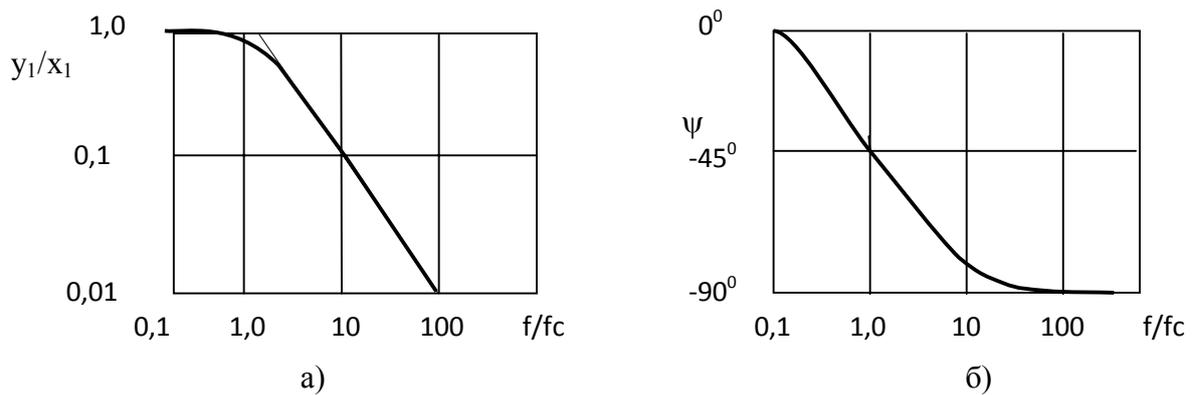


Рис. 2.2. Частотные характеристики системы первого порядка: а) -АЧХ; б) -ФЧХ

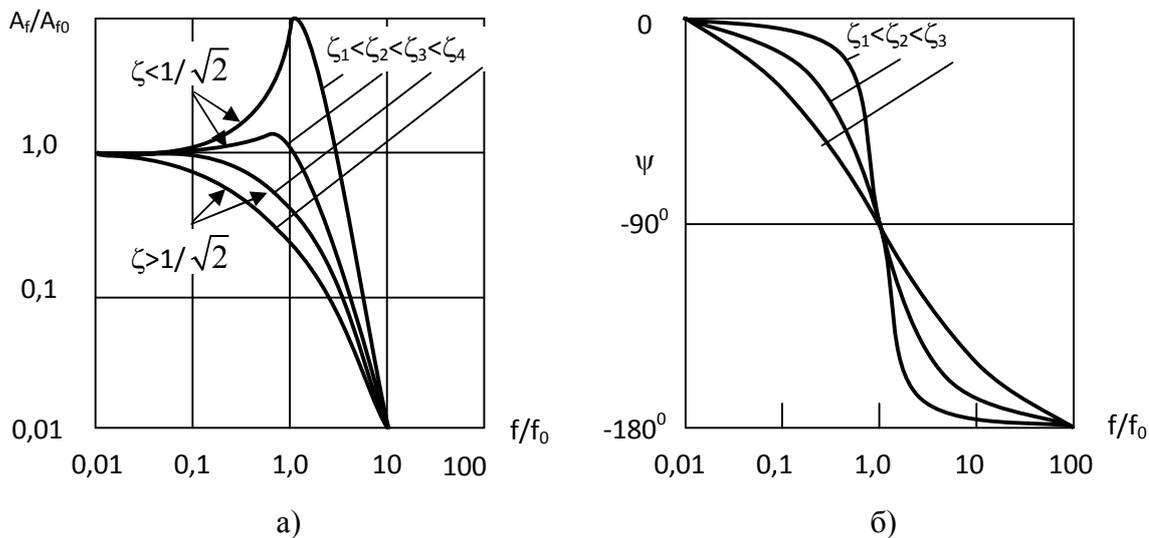


Рис. 2.3. Частотные характеристики системы второго порядка: а) –АЧХ; б) –ФЧХ

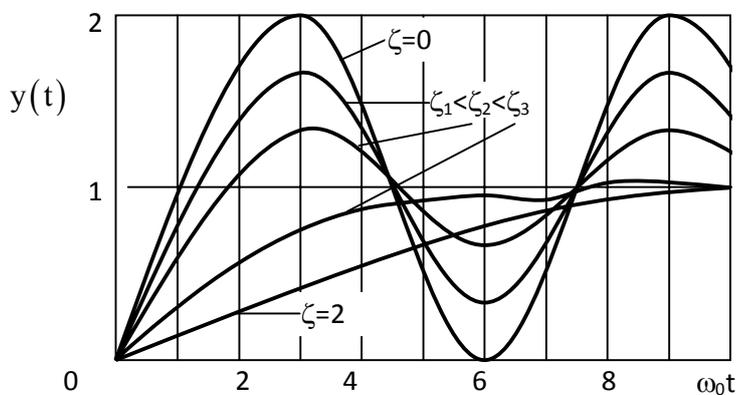


Рис. 2.4. Переходные функции системы второго порядка



Рис.2.5. Временное и частотное представление постоянного сигнала

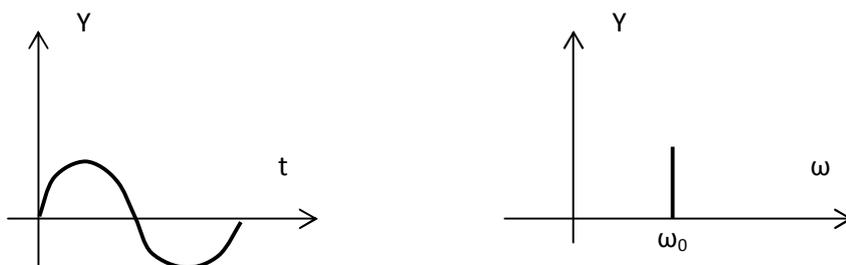


Рис. 2.6. Временное и частотное представление периодического сигнала



Рис 2.7. Временное и частотное представление ступенчатой единичной функции

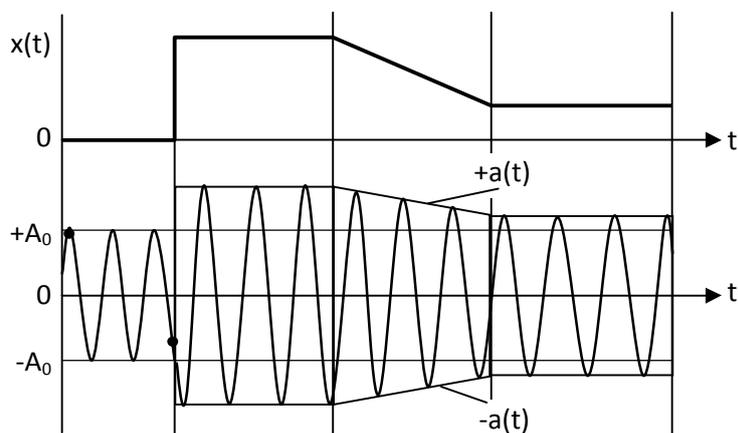


Рис. 2.8. Графическое представление амплитудной модуляции гармонического сигнала

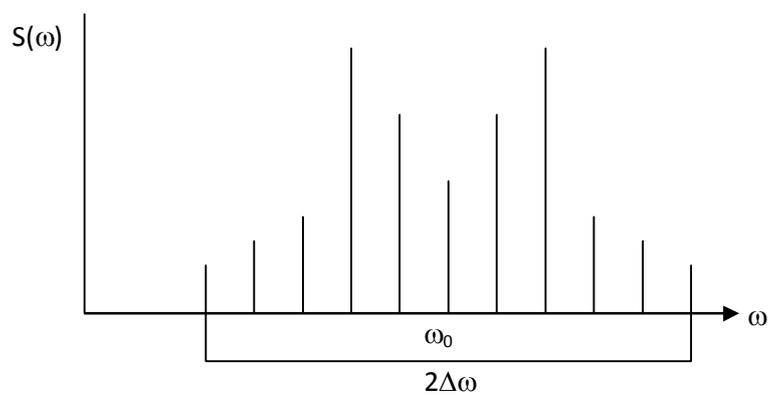


Рис.2.9. Спектр амплитуд частотно-модулированного сигнала при индексе частотной модуляции 5

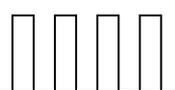
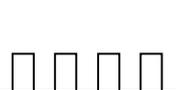
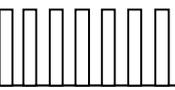
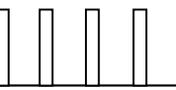
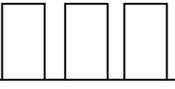
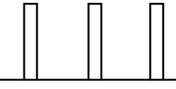
		Характер изменения физической величины
		Амплитудно-импульсная, параметр модуляции A_m
		Частотно-импульсная, параметр модуляции f
		Широтно-импульсная, параметр модуляции τ
		Фазово-импульсная, параметр модуляции φ

Рис.2.10. Диаграммы различных видов импульсной модуляции измерительного сигнала

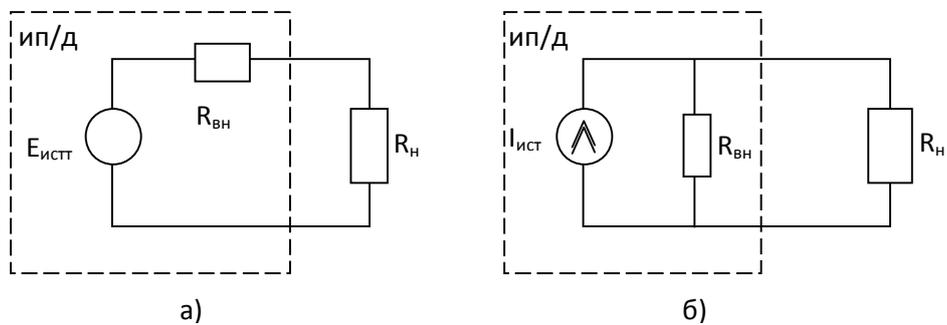


Рис. 2.11. Схемы включения датчика: а) потенциометрическая, $R_{вн} \ll R_{н}$;

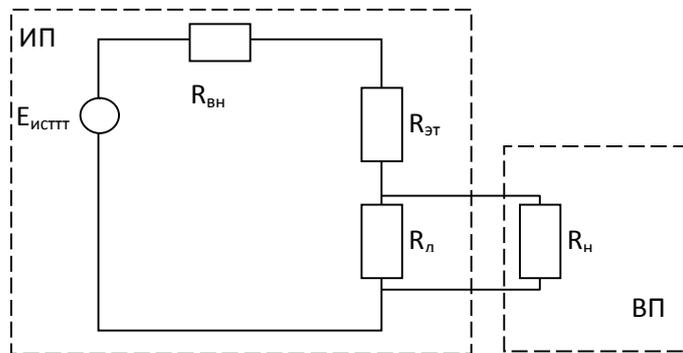


Рис.2.12. Схема с делителем $U_H = U_D = E_{истт} R_D / (R_D + R_{вн} + R_{эт})$

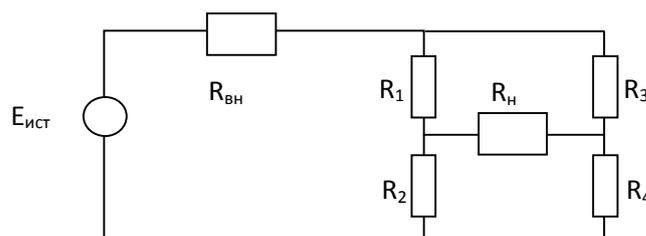


Рис.2.13. Резистивный мост Уитстона

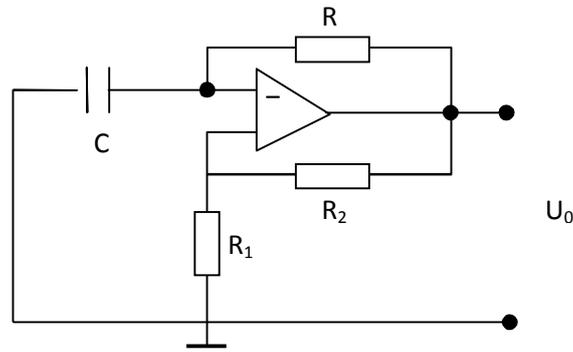


Рис. 2.14. Схема мультивибратора с самовозбуждением на операционном усилителе

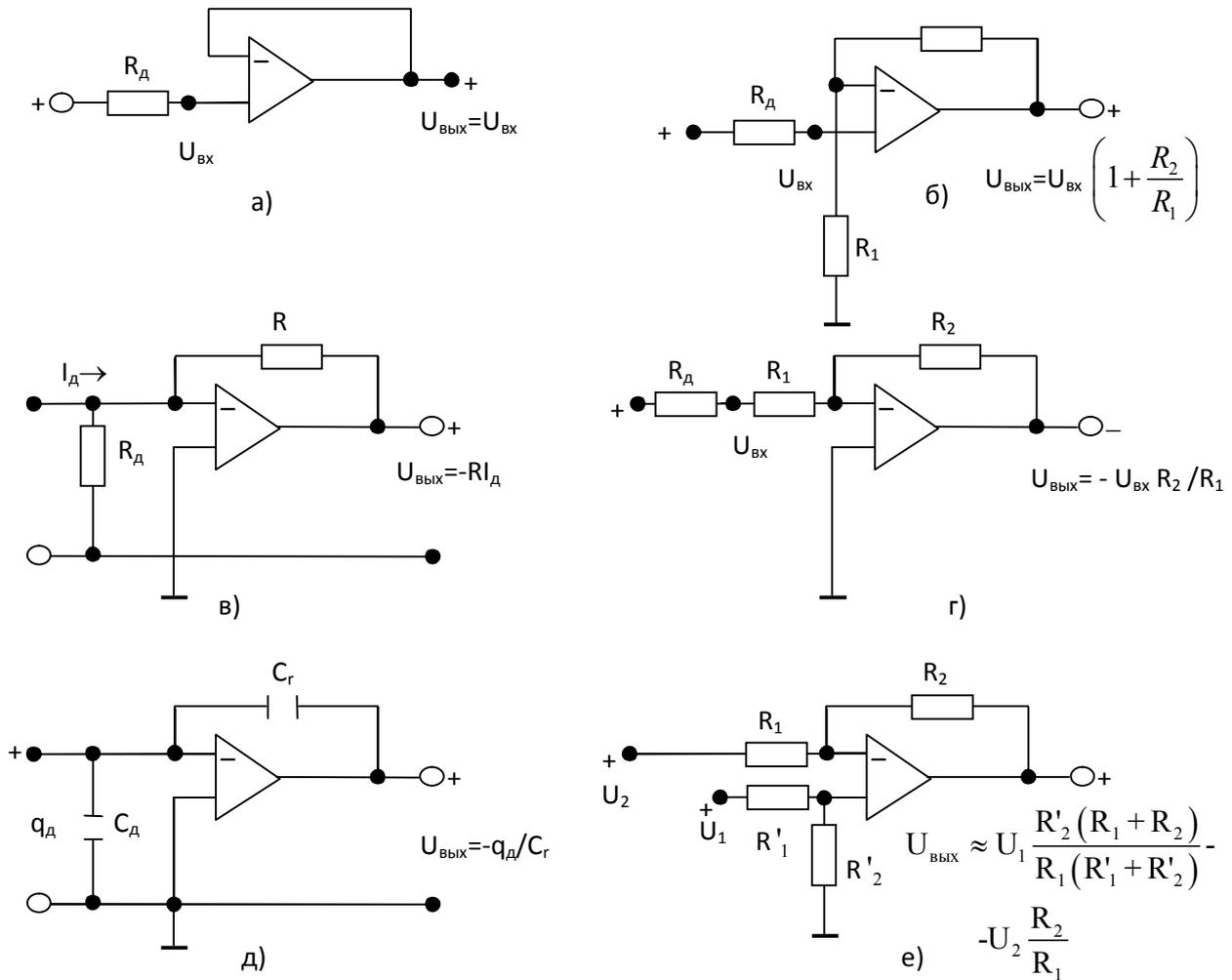


Рис. 2.15. Схемы преобразования измерительного сигнала датчика: а) повторитель напряжения; б) неинвертирующий усилитель напряжения; в) преобразователь ток-напряжение; г) инвертирующий усилитель напряжения; д) электрометрический усилитель (датчик-источник заряда); е) дифференциальный усилитель

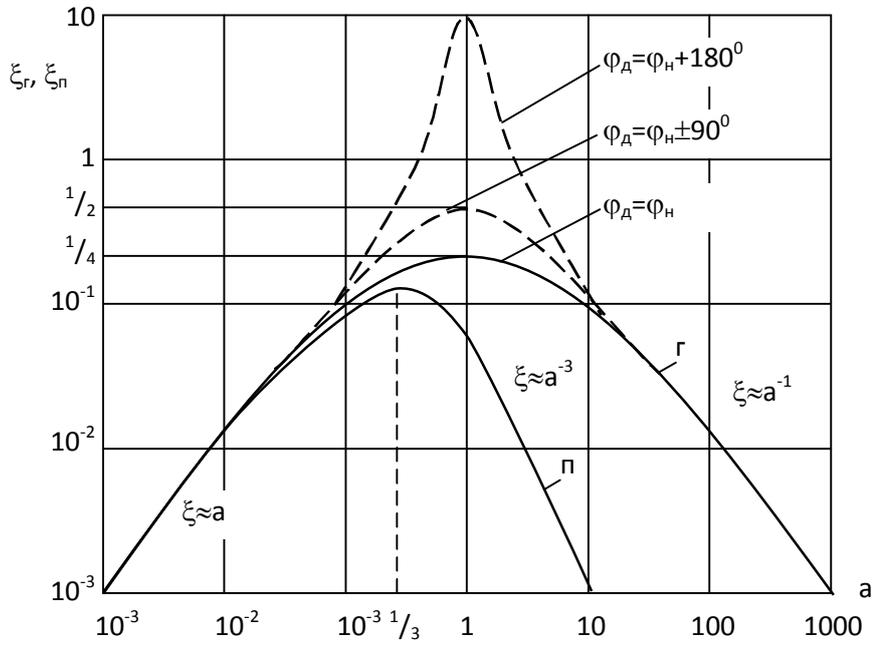


Рис.2.16. Согласование датчика и цепи по передаваемой мощности, г – генераторный датчик; п – параметрический датчик

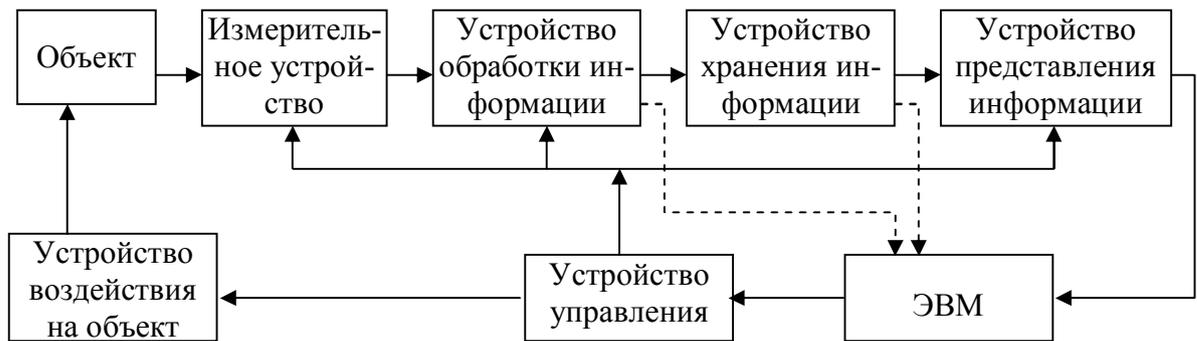


Рис. 2.17. Структурная схема ИИС



Рис.2.18. Структурная схема ИС

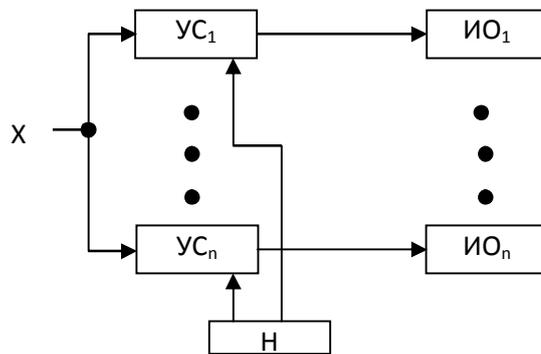


Рис.2.19. Структурная схема канала САК с непрерывным контролем: УС – устройство сравнения; ИО – устройство индикации отклонения; Н – устройство выработки и хранения норм

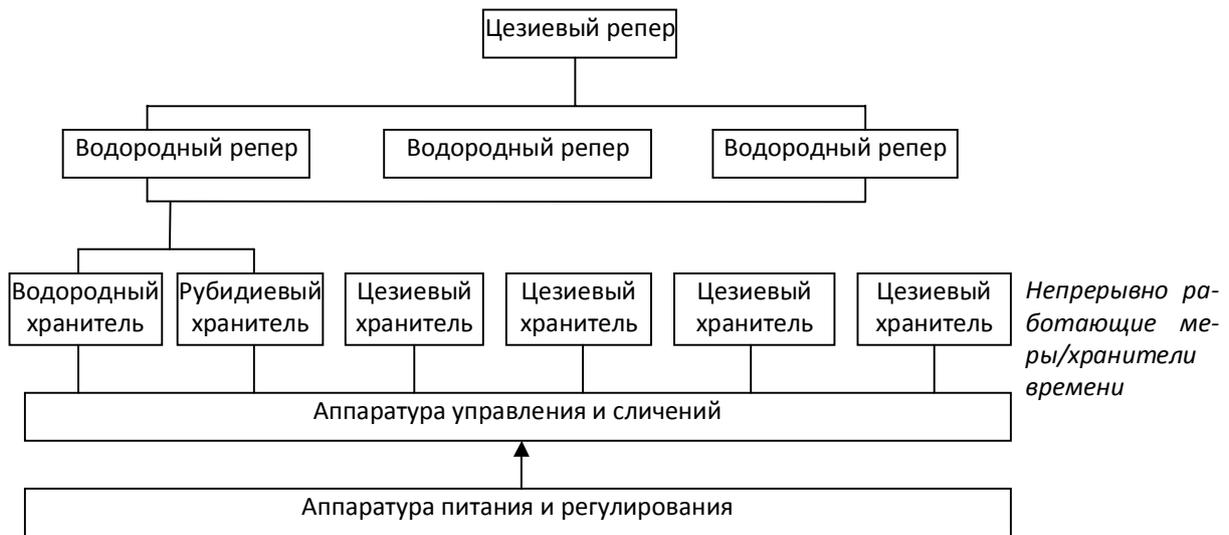


Рис. 3.1. Структура ГПЭ РФ времени и частоты

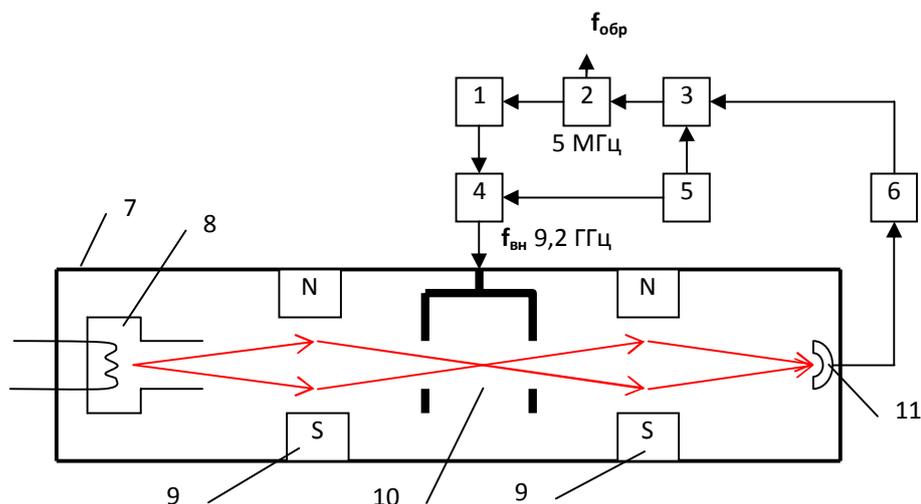


Рис.3.2. Схема цезиевого репера частоты: 1 – синтезатор; 2 – кварцевый генератор; 3 - блок автоподстройки частоты; 4 – умножитель частоты; 5 – модулирующий генератор; 6 – усилитель сигналов; 7 – атомно-лучевая трубка (вакуумная); 8 – источник атомов цезия с нагреваемой спиралью; 9 – отклоняющее магнитное поле; 10 - объемный резонатор; 11 – детектор частиц по ионному току

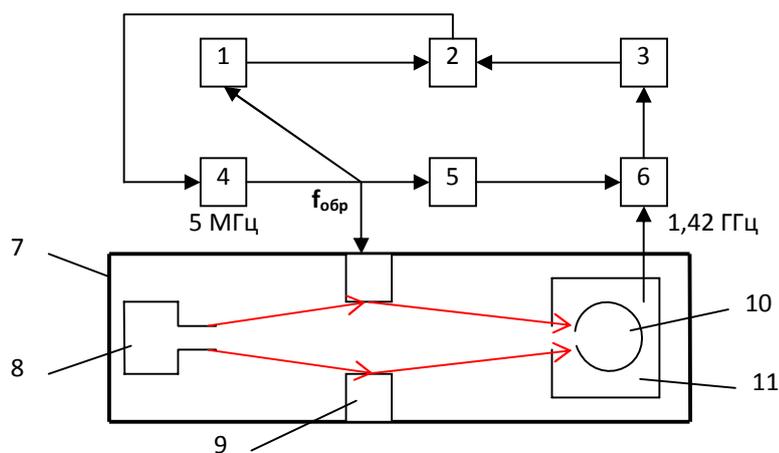


Рис.3.3. Схема водородного репера: 1 – синтезатор частоты; 2 – фазовый детектор; 3 – усилитель промежуточной частоты; 4 – кварцевый генератор; 5 – умножитель частоты; 6 – смеситель; 7 – водородный генератор; 8 – источник атомов водорода; 9 - отклоняющее магнитное поле; 10 – накопитель; 11 – объемный резонатор

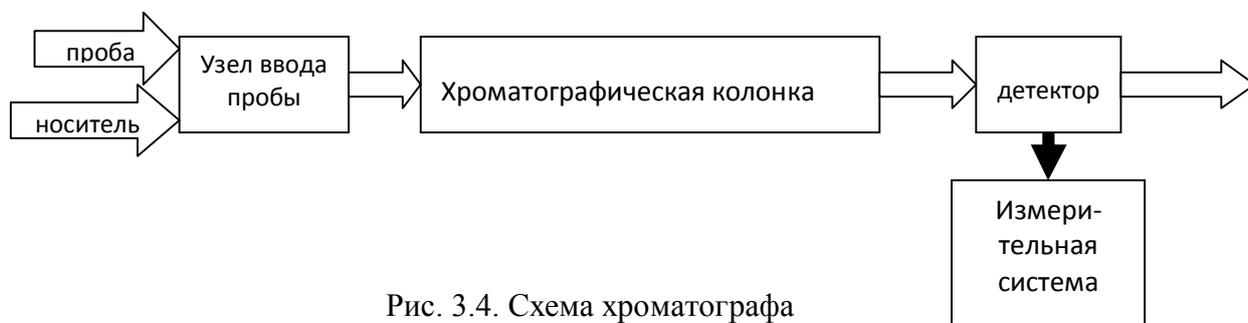


Рис. 3.4. Схема хроматографа

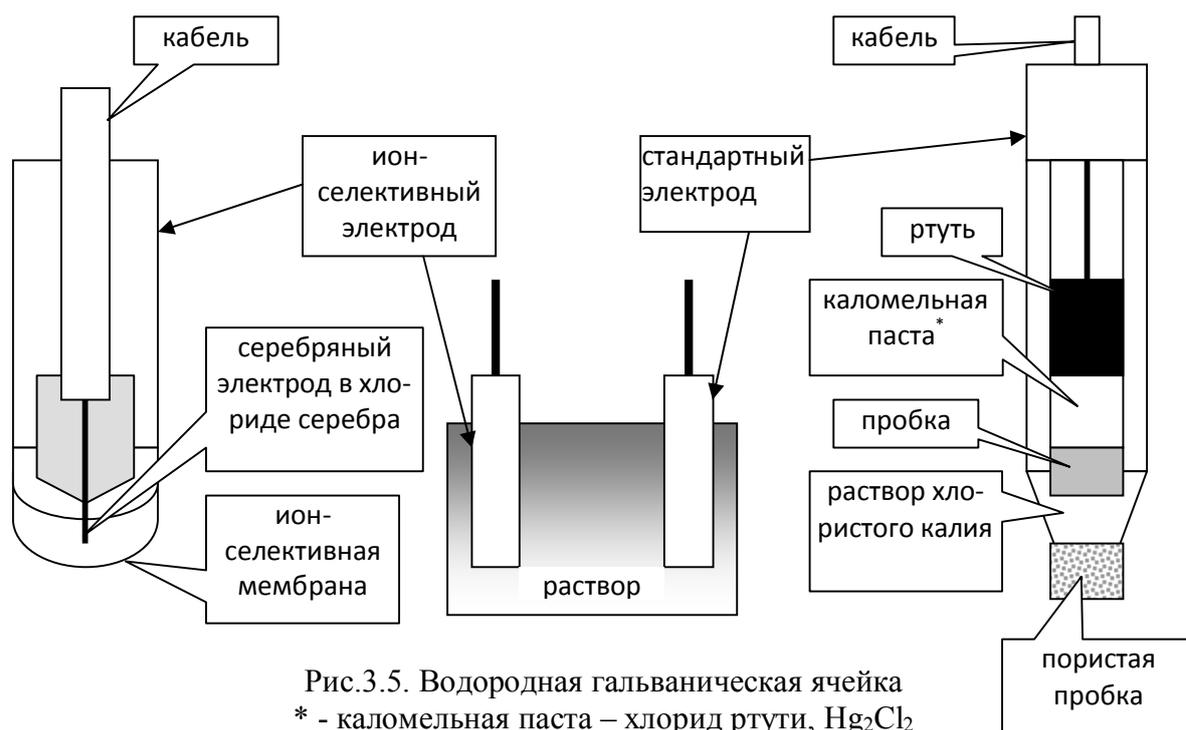


Рис.3.5. Водородная гальваническая ячейка
* - каломельная паста – хлорид ртути, Hg_2Cl_2

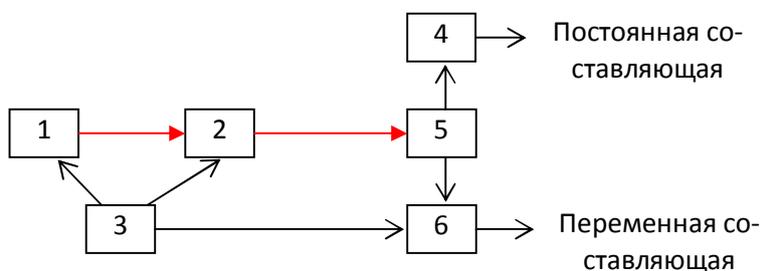


Рис. 3.6. Схема лазерного абсорбционного измерителя концентраций:
1 – лазер; 2 – кювета с газовой смесью; 3 – управляемый частотный модулятор; 4 – ФНЧ; 5 – фотоприемник; 6 – синхронный усилитель (СУ)

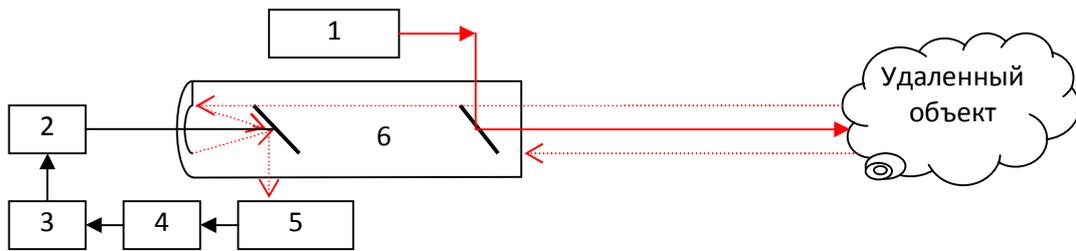


Рис. 3.7. Схема дистанционного анализа спектров комбинационного рассеяния, возбуждаемого импульсным лазером:
 1 – лазер; 2 – ЭВМ (банк спектров; управление); 3 – телевизионная трубка; 4 – электронно-оптический преобразователь; 5 – монохроматор; 6 - телескоп

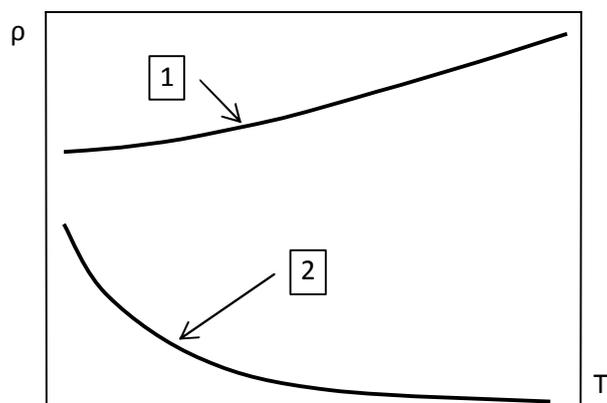


Рис. 3.8. Общий вид зависимости удельного электросопротивления ρ металлов (1) и полупроводников (2) от температуры T

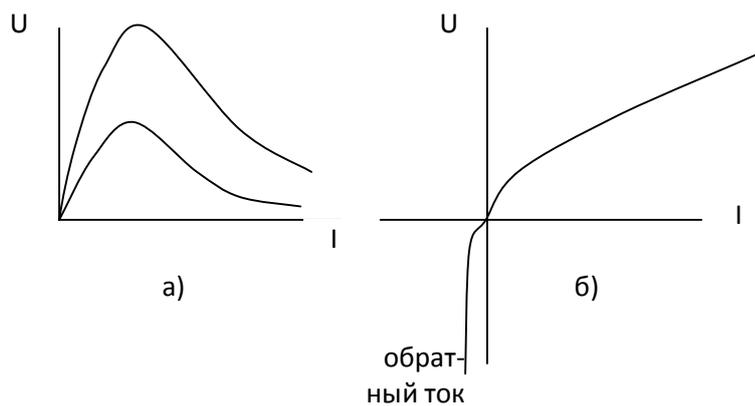


Рис. 3.9. Общий вид ВАХ терморезистора (а), $p-n$ перехода (б)

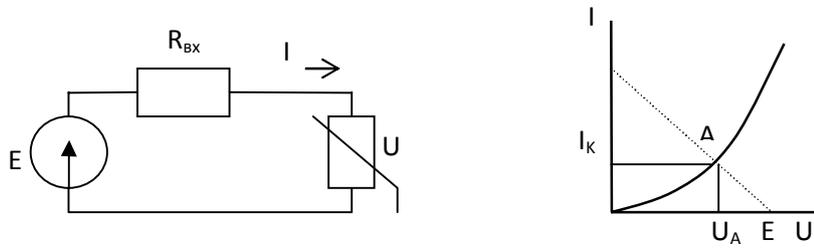


Рис. 3.10. Эквивалентная схема и ВАХ цепи с нелинейным резистором. А – рабочая точка характеристики



Рис. 3.11. Схема термоэлектрического преобразователя температуры

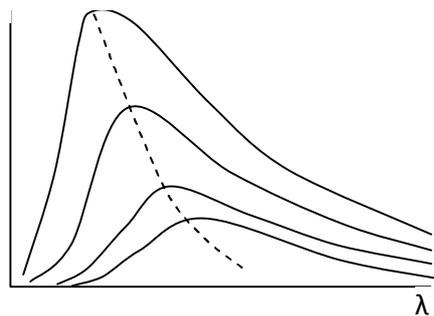


Рис. 3.12. Изотермы Планка при разных температурах излучающего АЧТ

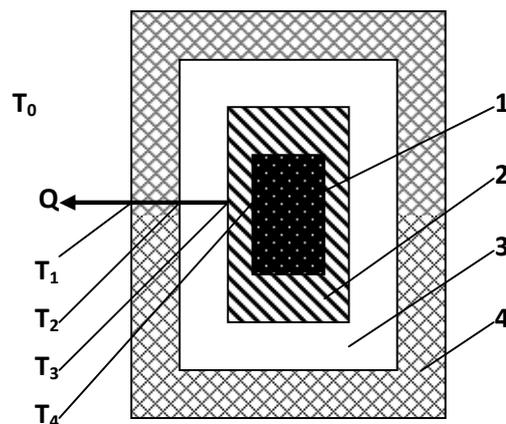


Рис.3.13. Схема твердотельного калориметра с кондуктометрическим механизмом отвода тепла (теплопроводностью): 1- рабочее тело; 2 – металлический блок; 3 – газовая прослойка; 4 – теплоизоляция (или корпус)

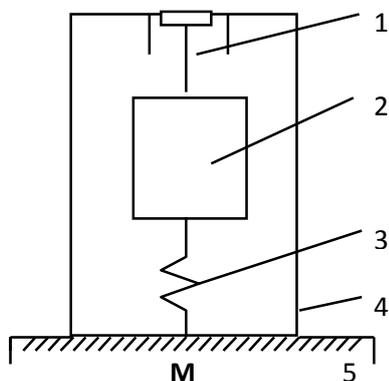


Рис.3.14. Механический аналог датчика абсолютных вибраций: 1 – демфирующее устройство; 2 – инерциальная масса (M); 3 – упругий элемент связи с корпусом; 4 – корпус; 5 – исследуемая конструкция

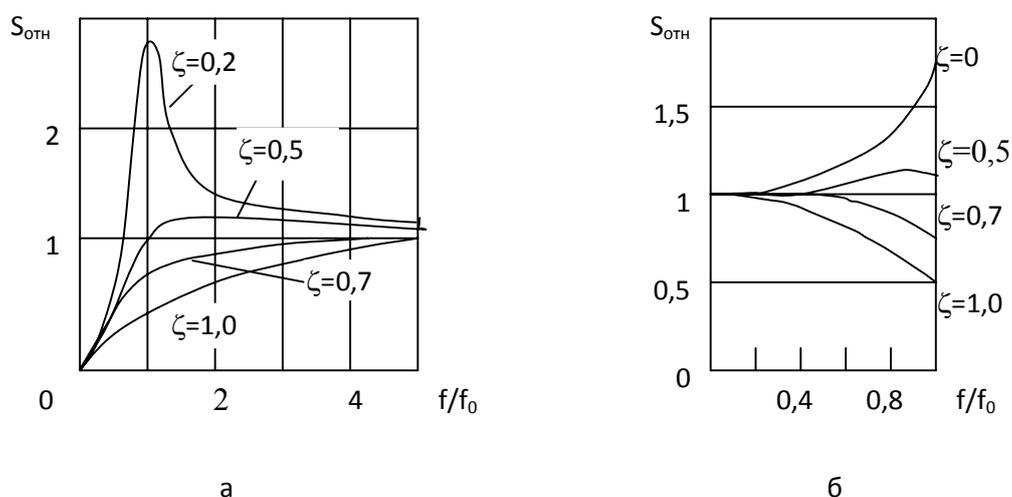


Рис.3.15. Чувствительность $S_{отн}$, сейсмического преобразователя виброперемещений (а) и виброускорений (б) в зависимости от частоты вибрации f и коэффициента демпфирования ζ

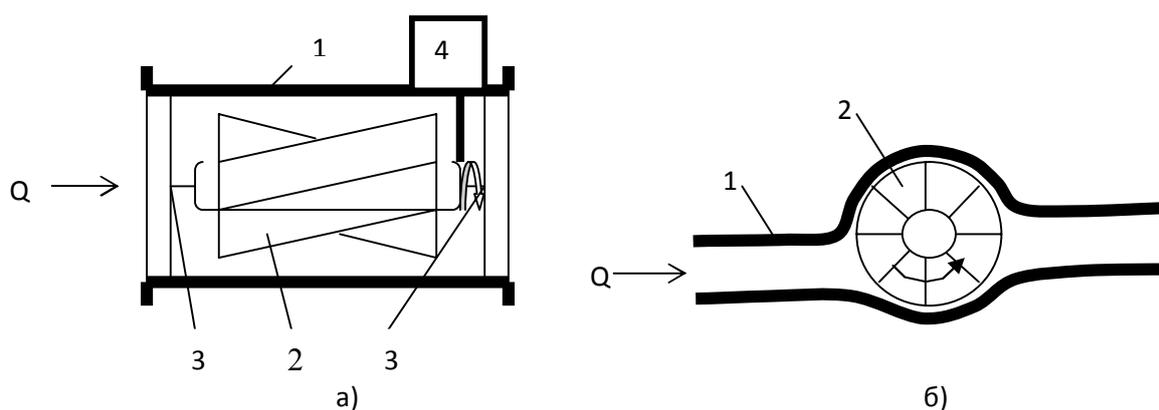


Рис.3.16. Схема турбинного расходомера: а) – осевая турбинка; б) – тангенциальная турбинка; 1 – измерительный трубопровод; 2 – турбинка (крыльчатка); 3 – опоры; 4 – устройство счета оборотов

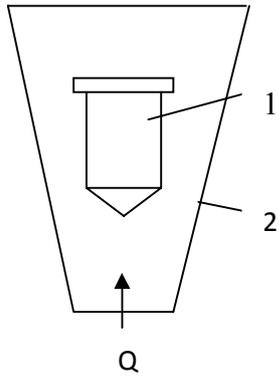


Рис.3.17. Схема ротаметра: 1 – поплавок; 2 – конический канал

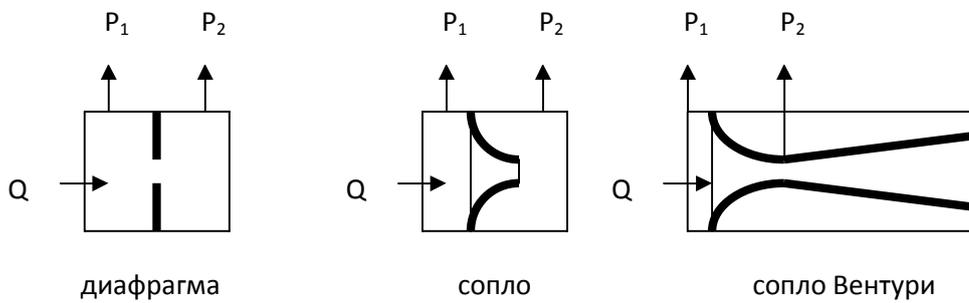


Рис.3. 18. Схема сужающих устройств расходомеров переменного перепада давления: P_1, P_2 – отбор давления потока

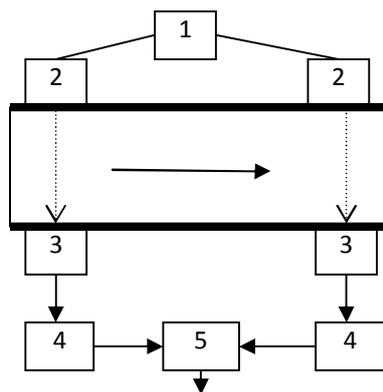


Рис. 3.19. Схема корреляционного метода измерения расхода: 1 – генератор; 2 - излучатель; 3 – приемник; 4 – усилитель+фильтр; 5 - коррелятор

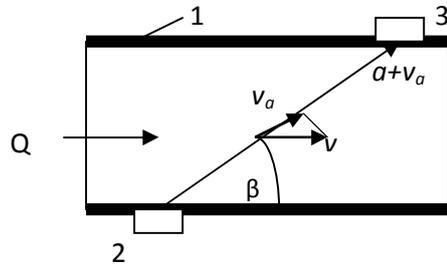


Рис.3. 20. Схема ультразвукового расходомера: 1 – измерительный трубопровод; 2 – излучатель; 3 – приемник

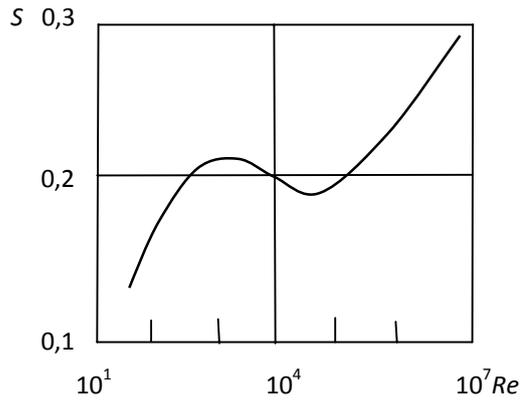


Рис. 3.21. Зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса

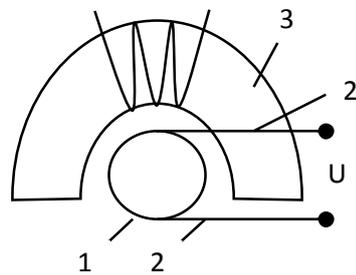


Рис.3.22. Схема магнитно-индукционного расходомера: 1- трубопровод; 2 – электроды (изолированные относительно трубопровода); 3 – электромагнит

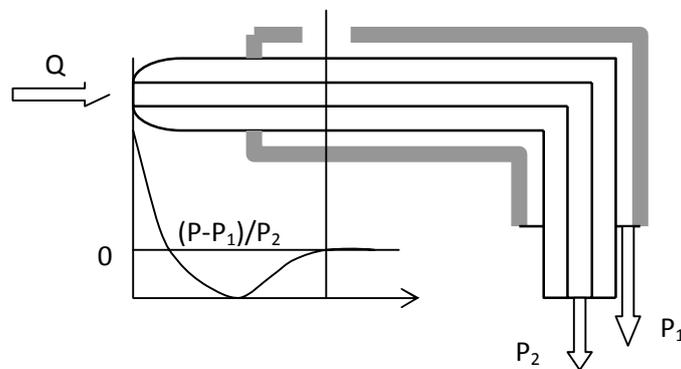


Рис. 3.23. Схема трубки Прандтля

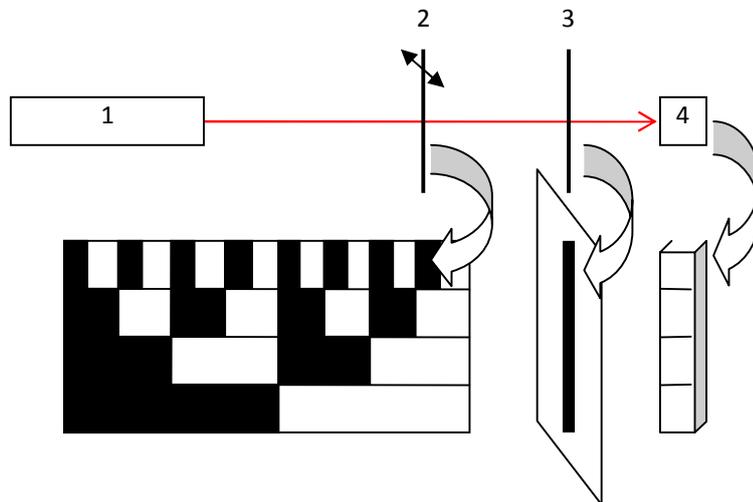


Рис.3.24. Схема метода оптической линейки: 1 – источник света; 2 - оптический кодер (штриховая линейка); 3 – диафрагма; 4 - фотоприемники

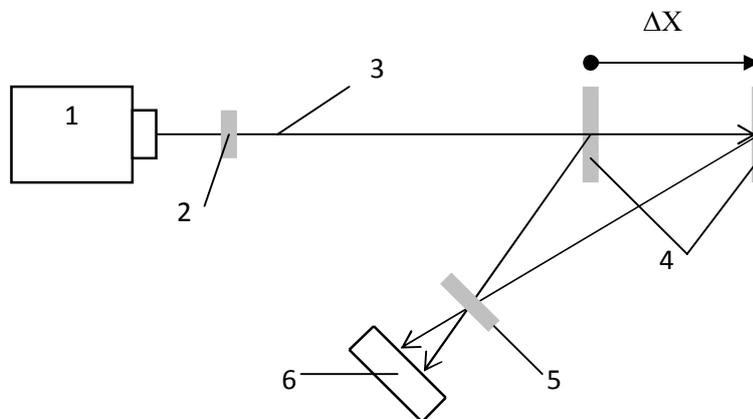


Рис. 3.25. Схема метода триангуляции: 1-источник света; 2-объектив источника; 3-луч света; 4-отражатель (зеркало); 5-объектив приемника; 6-приемник света

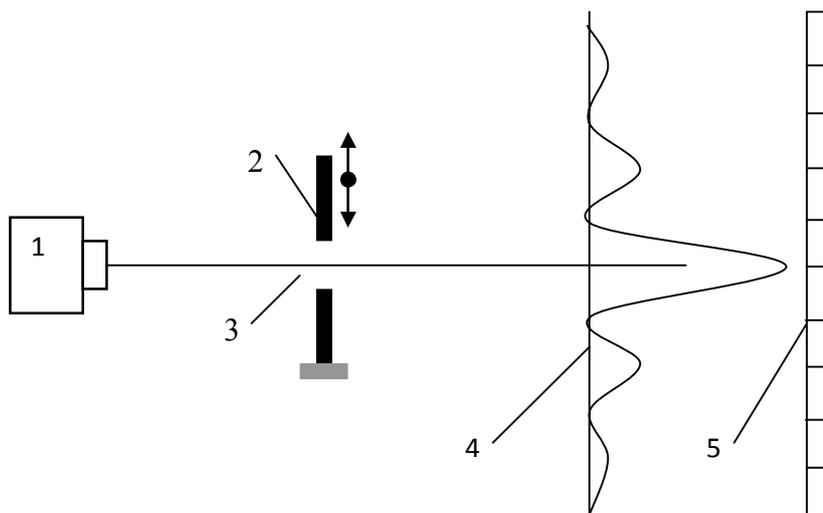


Рис.3.26. Схема дифракционного метода: 1-источник света; 2-перемещаемый объект; 3-щель; 4-дифракционный узор; 5-фотодиодный приемник

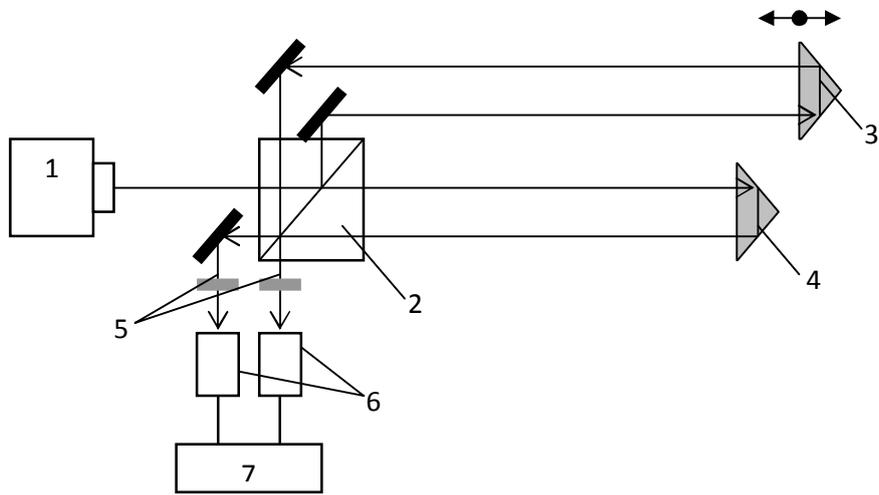


Рис.3.27. Схема двухлучевого (лазерного) интерферометра Майкельсона: 1- лазерный источник света; 2-светоделитель; 3-подвижный отражатель; 4- неподвижный отражатель; 5-поляризационные фильтры; 6-приемники света; 7-устройство обработки сигналов

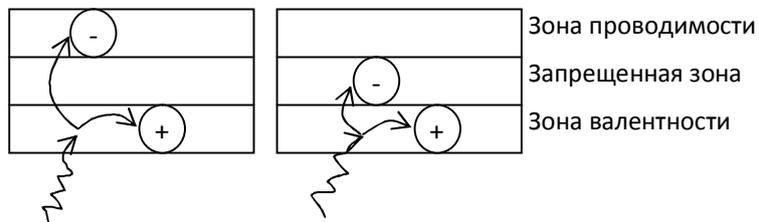


Рис. 3.28. Схема фотоэффекта в ПП фотодиоде

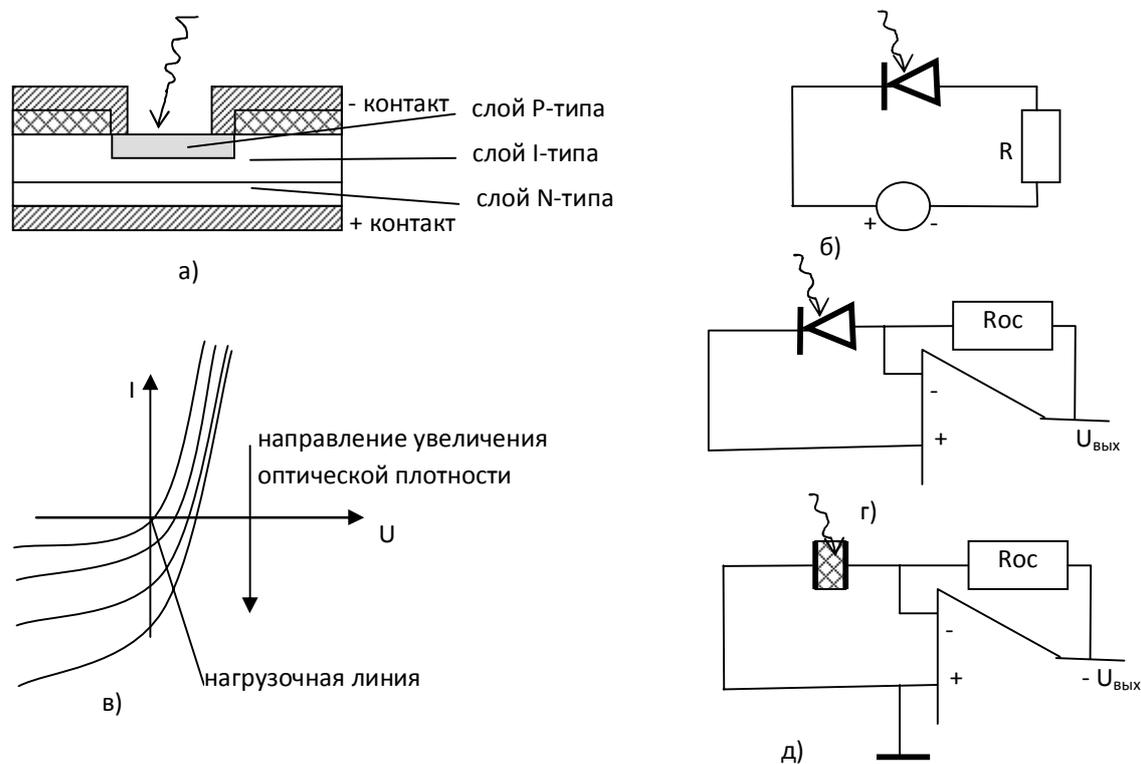


Рис. 3.29. Приемники излучения: а) – структура PIN фотодиода; б) – схема обратного подсоединения; в) – рабочая характеристика; г) – схема подключения фотодиода к преобразователю ток – напряжение; д) – схема подключения пьезоэлектрического датчика с операционным усилителем

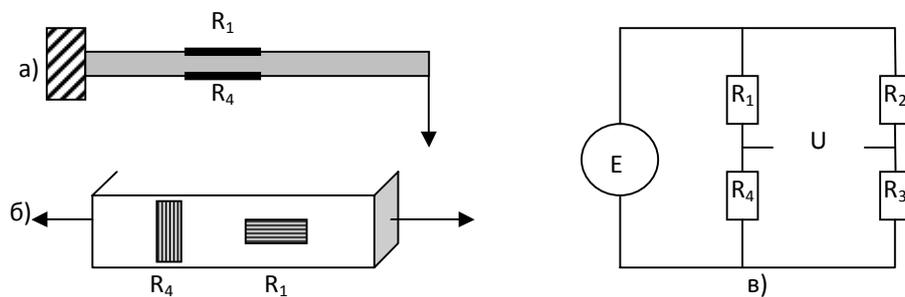


Рис. 3.30. Схемы с тензодатчиками: а) – изгиб; б) – растяжение; в) – мост Уитстона

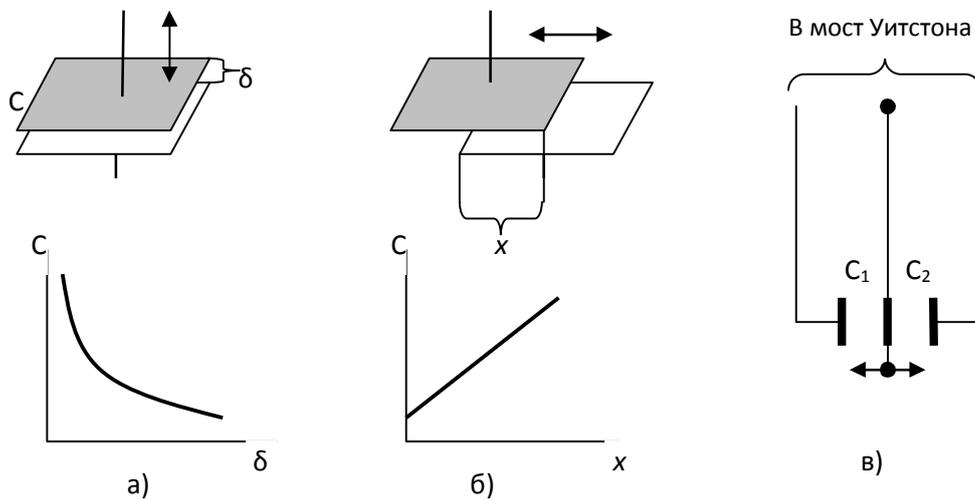


Рис.3.31. Схемы емкостных датчиков: а) - с изменением зазора; б) - площади обкладок; в) – дифференциальное включение

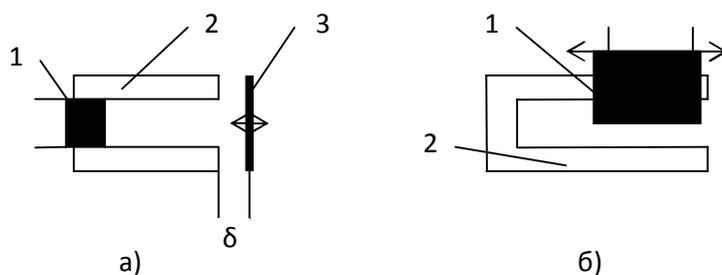


Рис.3.32. Схемы индуктивных преобразователей с переменным зазором - а) и переменным числом витков - б): 1 – обмотка индуктивности; 2 - магнитопровод; 3 - пластина

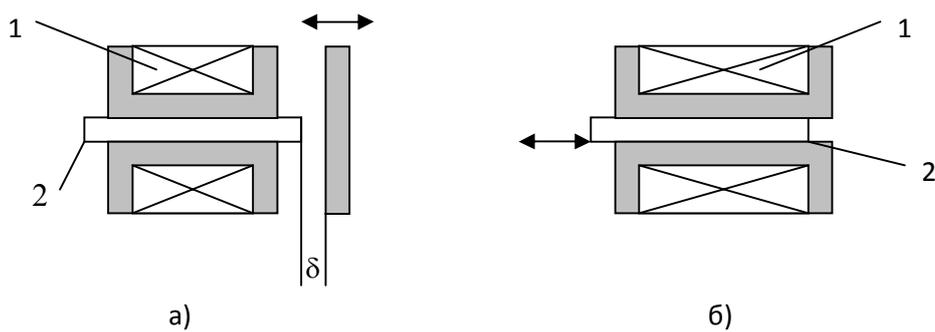


Рис. 3.33. Схемы цилиндрических индуктивных преобразователей: а) - с переменным воздушным зазором; б) - с разомкнутым контуром; 1 - обмотка индуктивности; 2 - ферромагнитный сердечник; δ - воздушный зазор

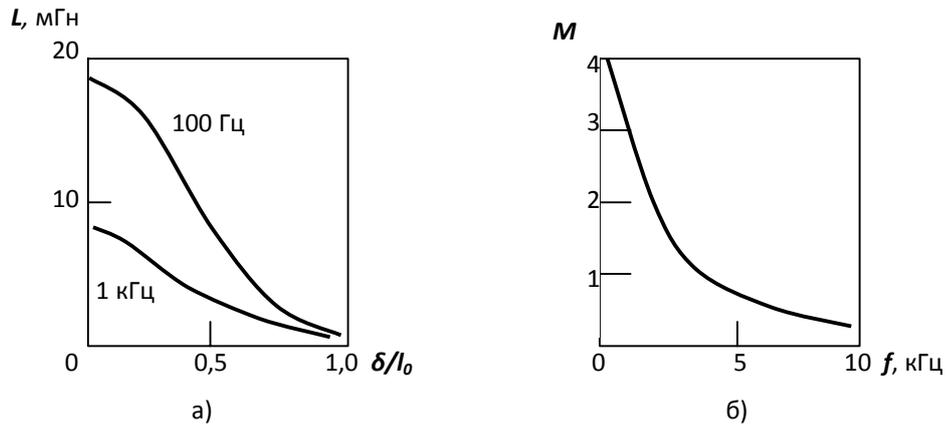


Рис. 3.34. Зависимость индуктивности обмотки (а) и коэффициента m (б) от относительного перемещения и частоты

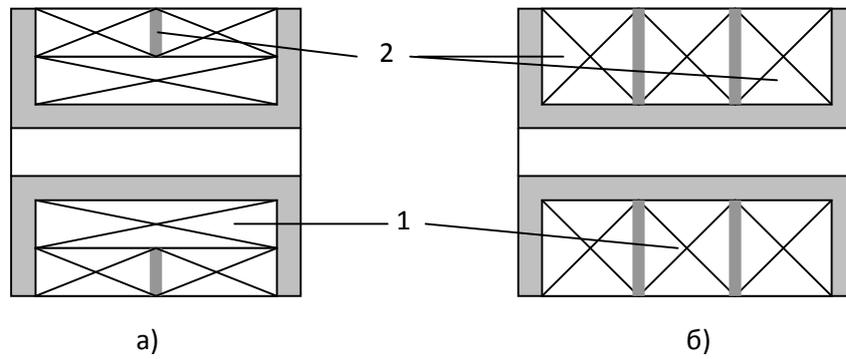


Рис.3.35. Схемы соленоидных ДТП с различным исполнением катушек: а - двухсекционная; б - трехсекционная; 1 - первичная обмотка; 2 - вторичная обмотка

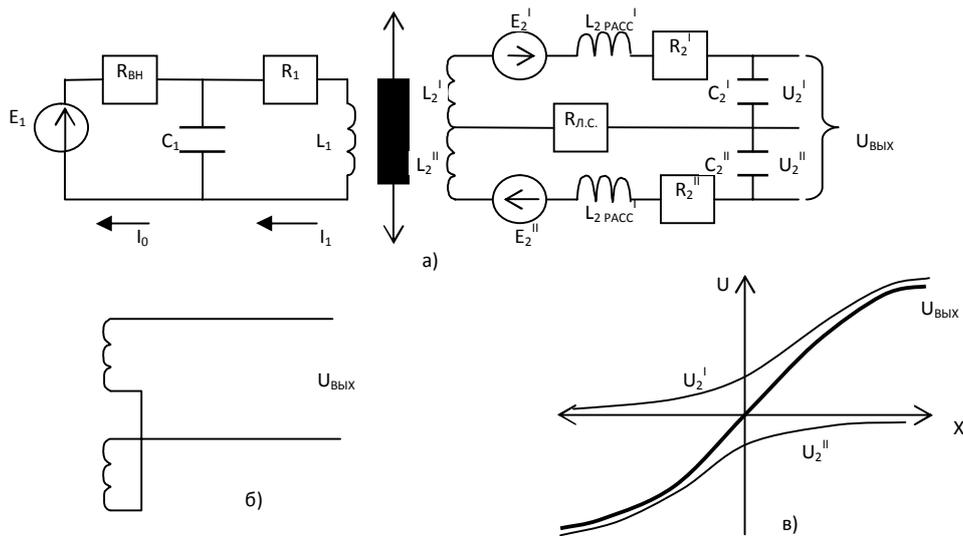


Рис. 3.36. Эквивалентная схема ДТП с общей центральной точкой вторичных обмоток (а); без центральной точки (б); вид выходного сигнала (в)

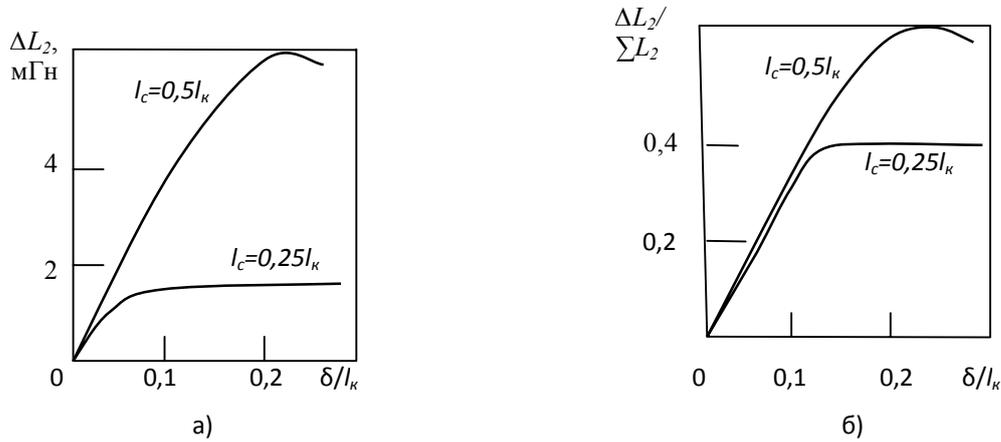


Рис. 3.37. Зависимость функции преобразования ДТГ от длины сердечника и вида выходного сигнала – стандартного (а) ($L_2' - L_2''$) и т.н. самокомпенсированного (б): $\Delta L_2 = (L_2' - L_2'')$; $\Delta L_2/\Sigma L_2 = [(L_2' - L_2'')/(L_2' + L_2'')]$; l_c – длина сердечника; l_k – длина катушки

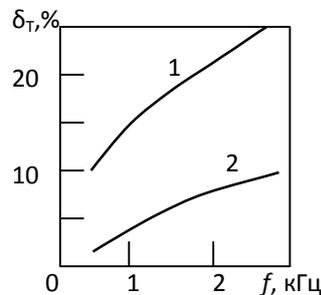


Рис. 3.38. Зависимость температурной погрешности (δ_T) от частоты питания (f) для стандартного – 1 ($U_{\text{вых}} = U_2' + U_2''$) и самокомпенсированного – 2 ($U_{\text{вых}} = (U_2' - U_2'')/(U_2' + U_2'')$) выходных сигналов

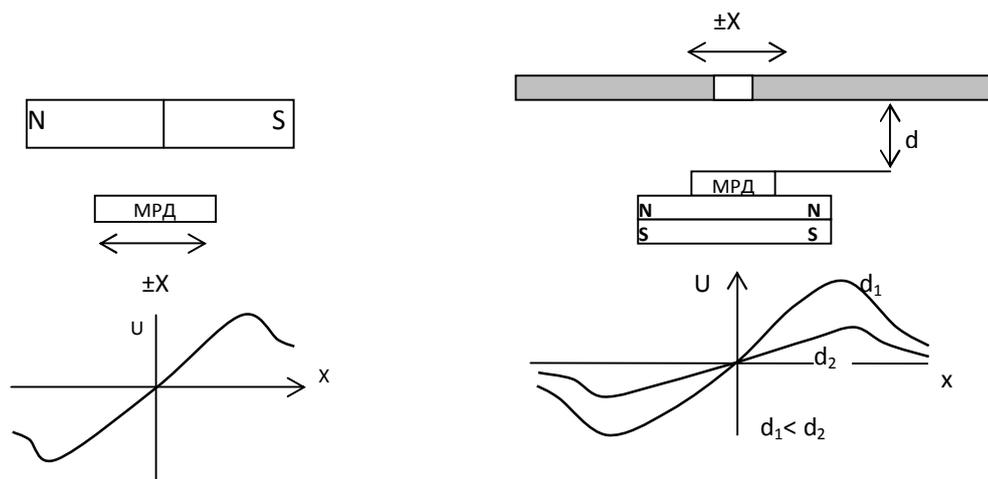


Рис. 3.39. Схемы магнитно-резистивных преобразователей линейных перемещений

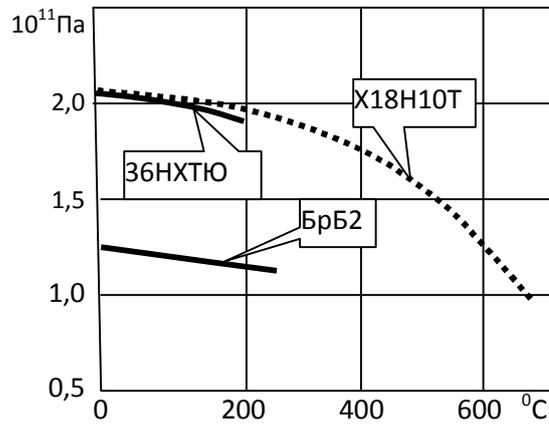


Рис. 3.40. Изменение модуля упругости с температурой

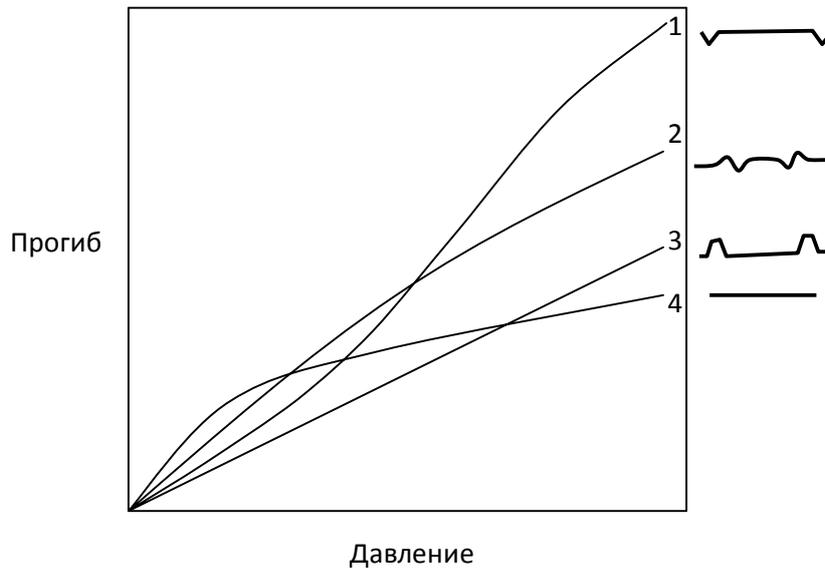


Рис. 3.41. Зависимость прогиба давления для мембран с разным гофром: 1 – краевой; 2 – синусоидальный; 3 – трапецеидальный; 4 - без гофра

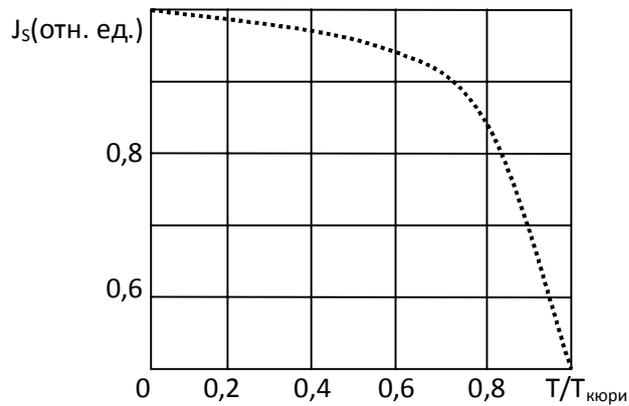


Рис. 3.42. Зависимость намагниченности насыщения ферромагнетика от температуры

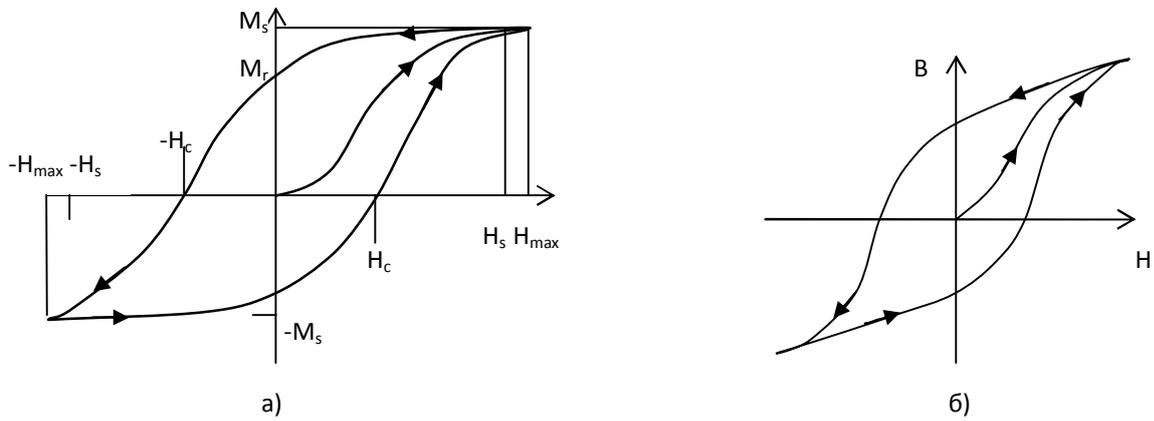


Рис. 3.43. Петля гистерезиса намагничивания ферромагнетика: $\pm M_s$ - намагниченность насыщения; $\pm M_r$ - остаточная намагниченность; $\pm H_c$ - коэрцитивная сила

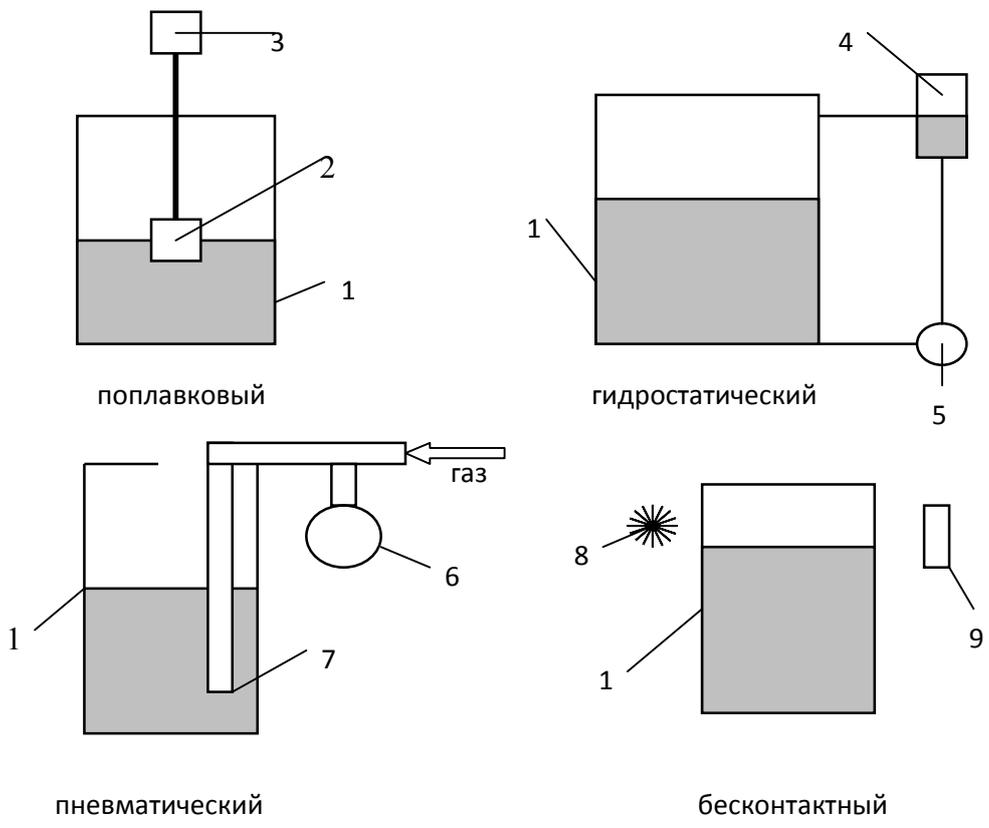


Рис. 3.44. Схемы уровнемеров: 1-сосуд; 2-поплавок; 3-датчик; 4-контрольный сосуд; 5-дифференциальный манометр; 6-манометр; 7-заглубленная в сосуд трубка; 8-источник

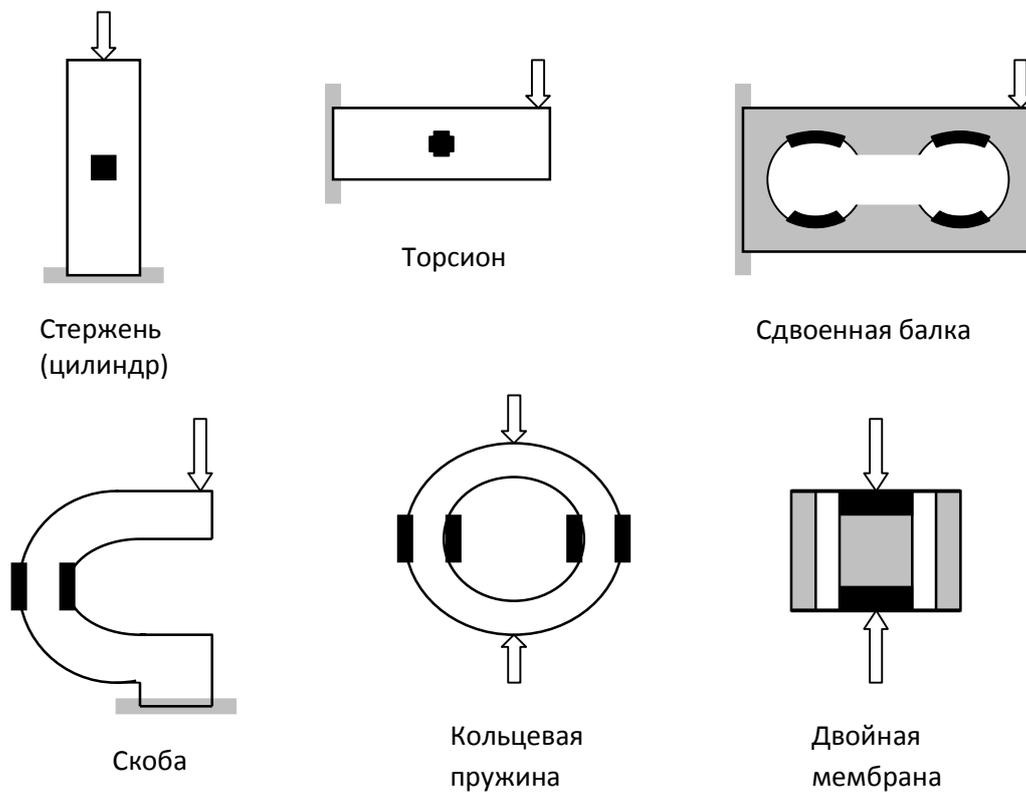


Рис.3.45. Схемы механических преобразователей силы (затемнены места установки тензодатчиков, стрелками показаны направления действия силы)

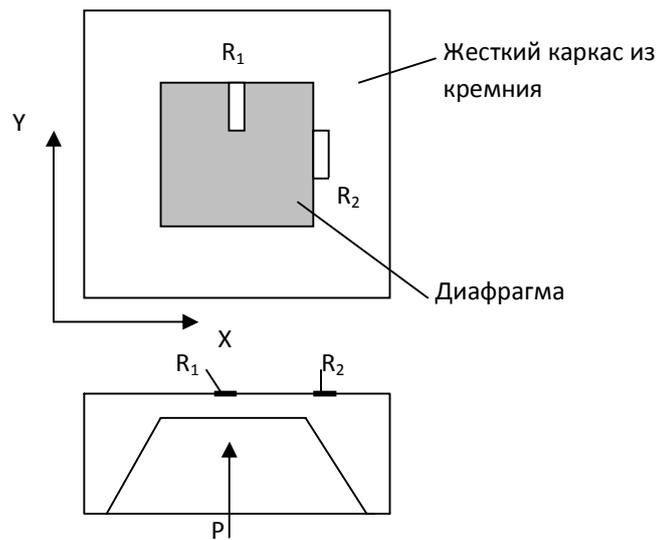


Рис.3.46. Схема пьезорезистивного датчика давления

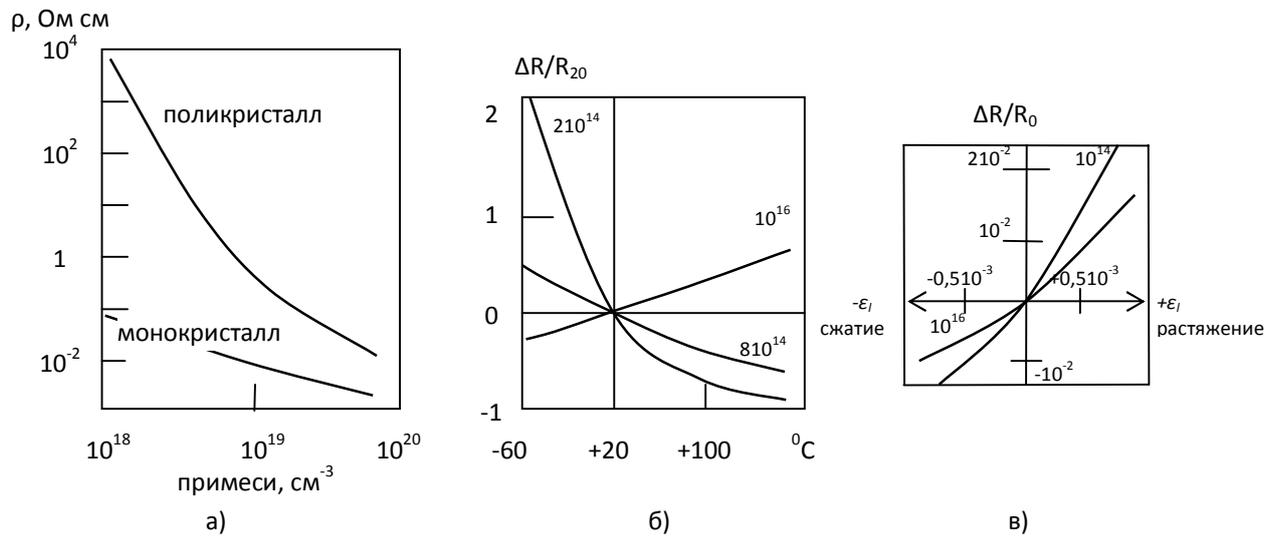


Рис.3.47. Зависимость удельного электрического сопротивления от кристаллической структуры и содержания примесей (а); температурного коэффициента сопротивления от температуры и концентрации (см⁻³) легирующих элементов (б); относительного изменения электрического сопротивления от направления деформирования и концентрации легирующих элементов (в) кристаллического кремния.

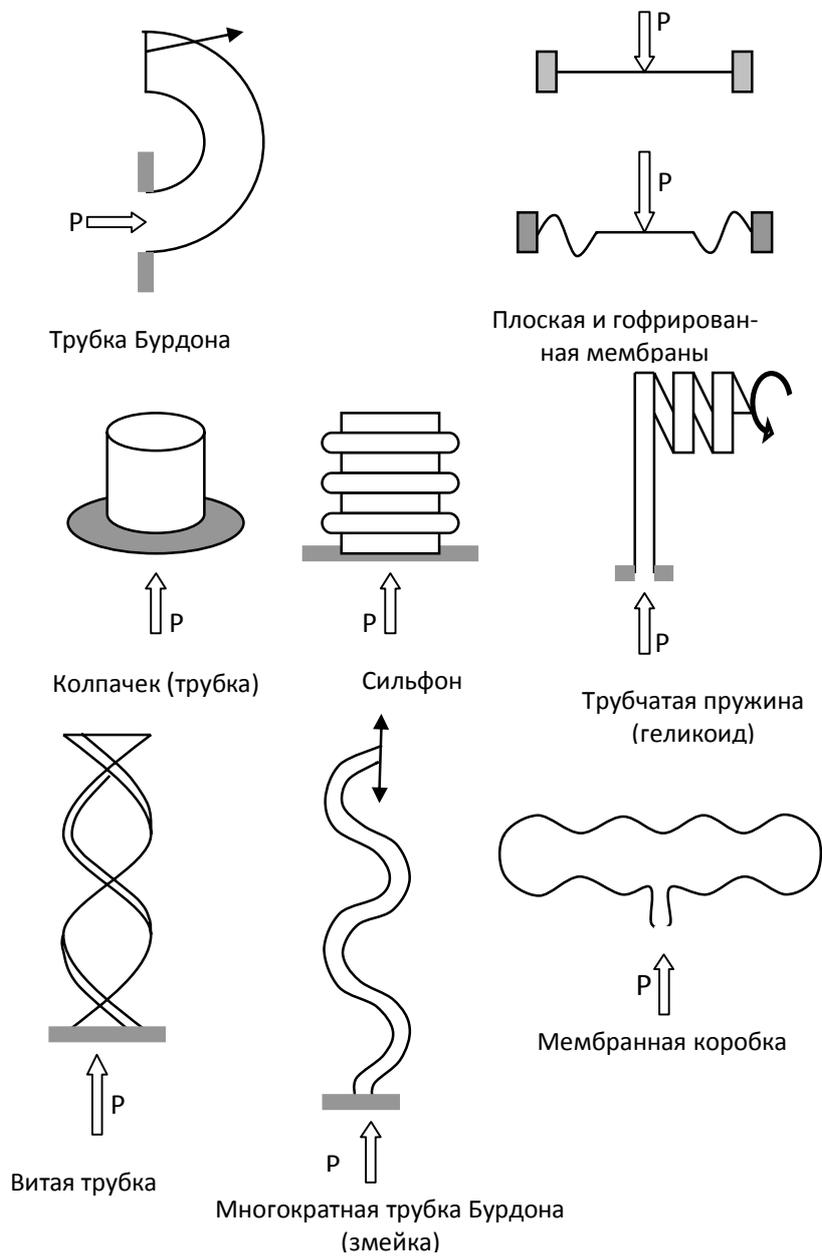


Рис.3.48. Схемы механического преобразования давления

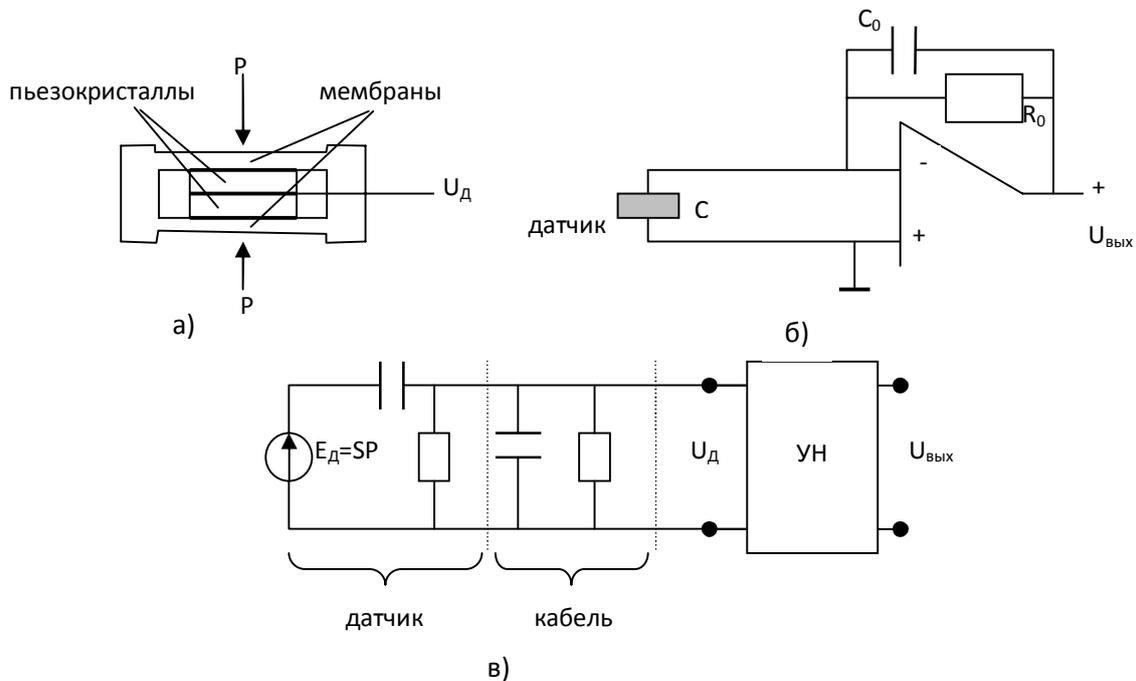


Рис. 3.49. Схемы включения пьезорезисторного датчика давления (а): с усилителем заряда (б), с усилителем напряжения (в)

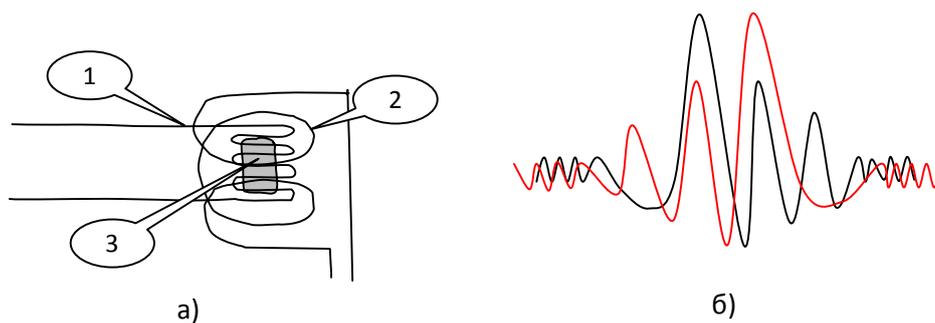


Рис. 3.50. Схема датчика ЯМР: а) 1 – генераторная катушка; 2 - модуляционная катушка; 3 – емкость с веществом; б) – осциллограмма резонанса

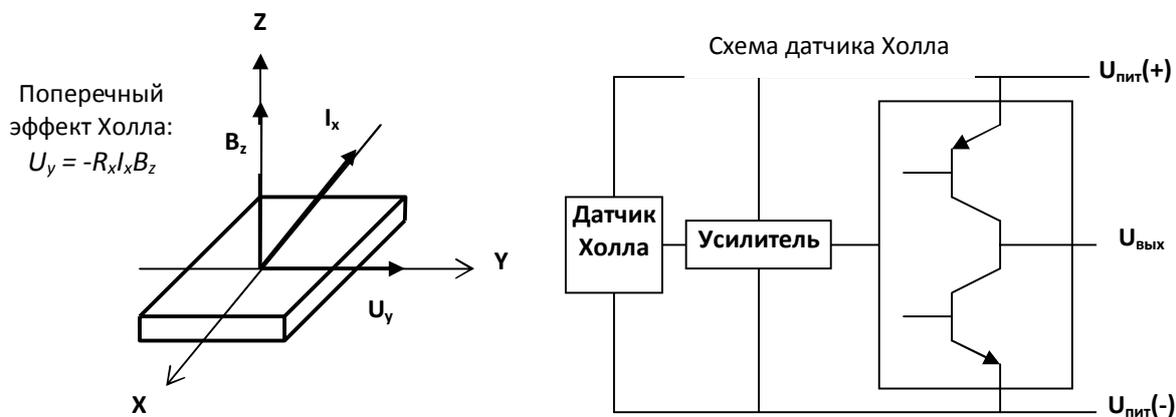


Рис.3.51. Схема генерации ЭДС и схема датчика Холла

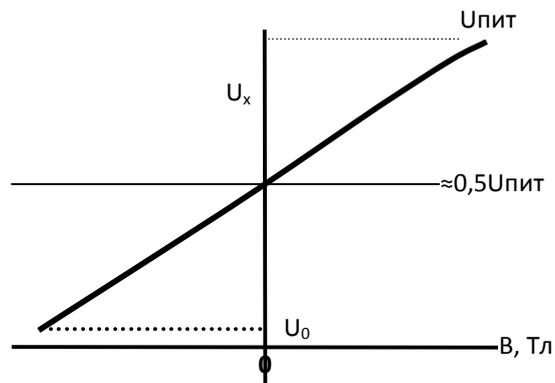


Рис.3.52. Вид характеристики преобразования датчика Холла

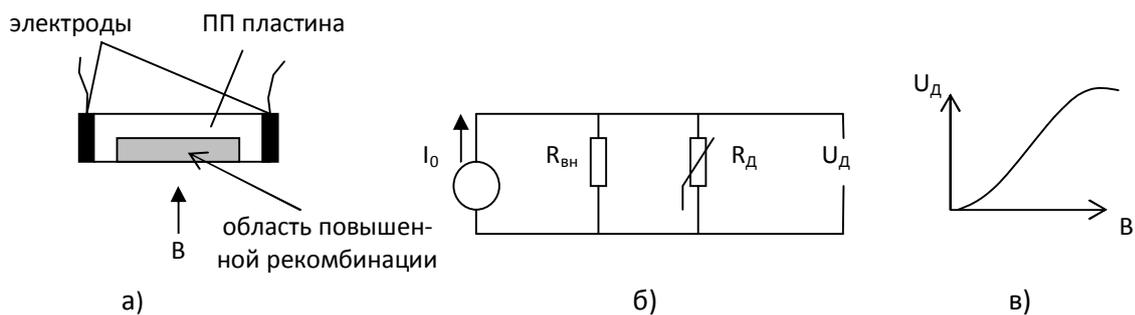


Рис. 3.53. Схема ГРМ - преобразователя (а); схема измерения сигнала (б); вид функции преобразования (в)

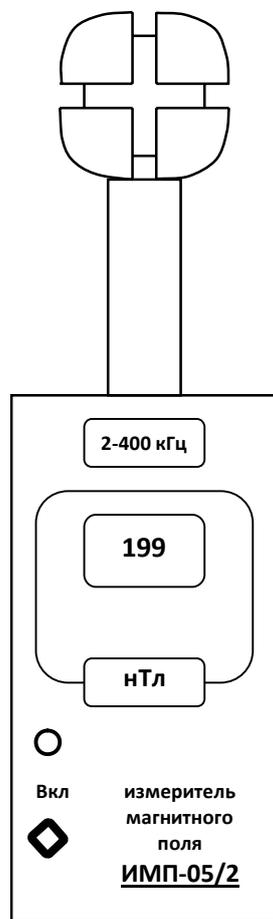


Рис.3.54. Внешний вид блока прибора

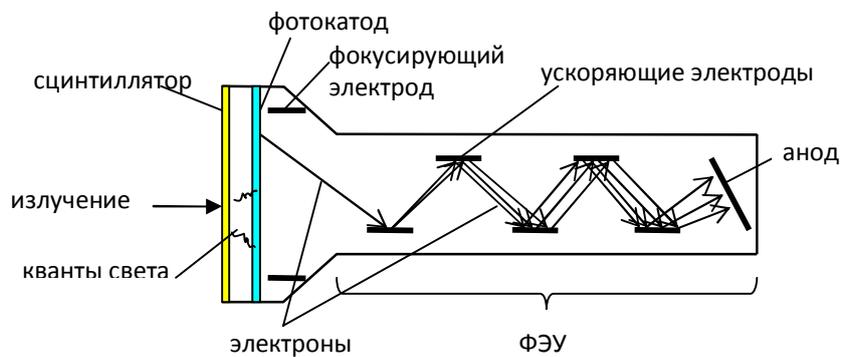


Рис. 3.55. Схема сцинтилляционного детектора

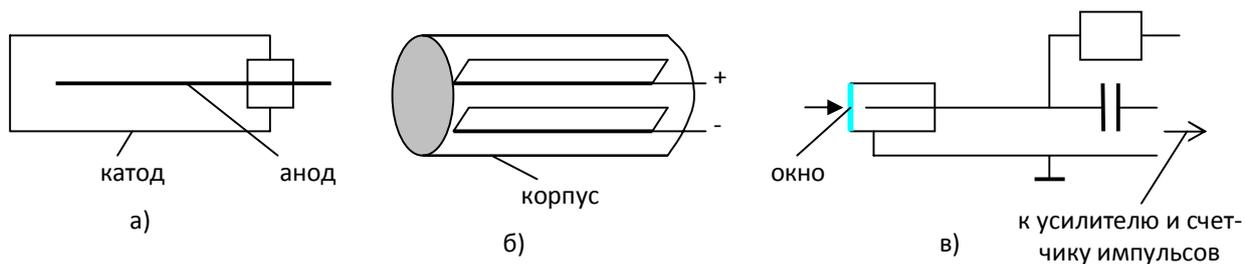


Рис. 3.56. Схемы ионизационных камер (а, б) и счетчика Гейгера (в)

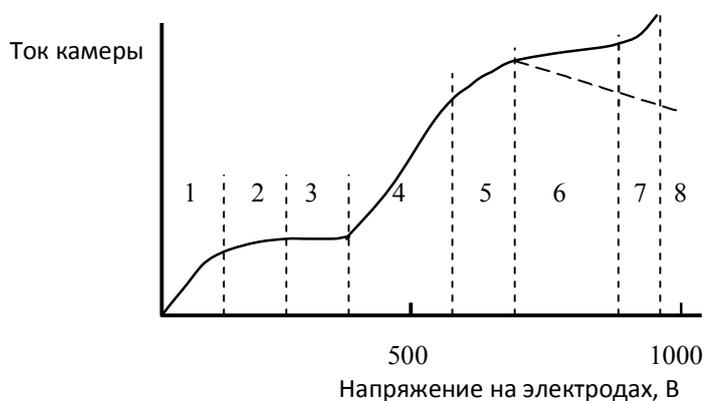


Рис. 3.57. Вольтамперная характеристика газонаполненных ионизационных детекторов излучений: 1-8 – области различных режимов ионизации.

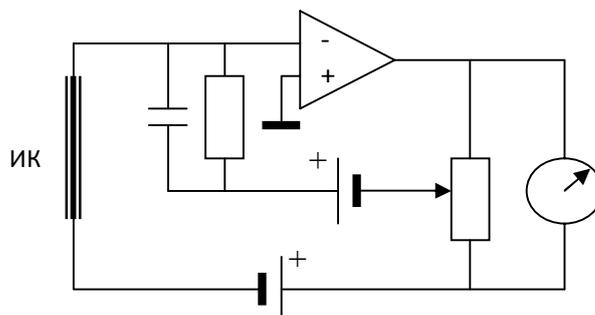


Рис.3.58. Схема измерения тока ИК с регулировкой нуля и диапазона

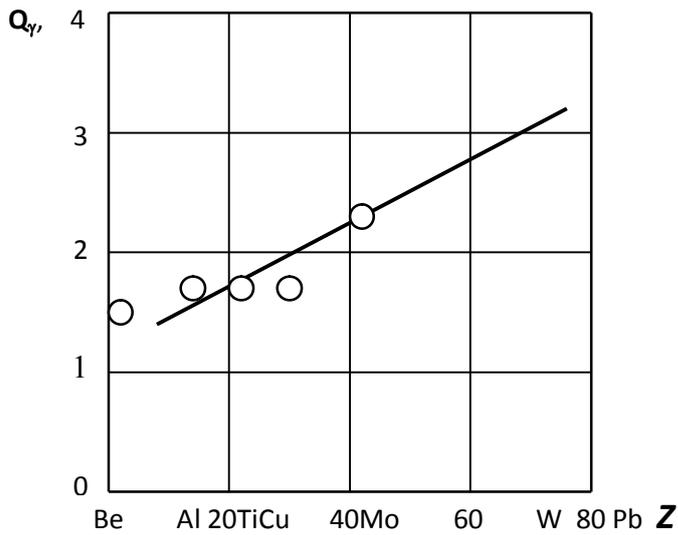


Рис.3.59. Зависимость мощности поглощенной дозы реакторного гамма-излучения от атомного номера

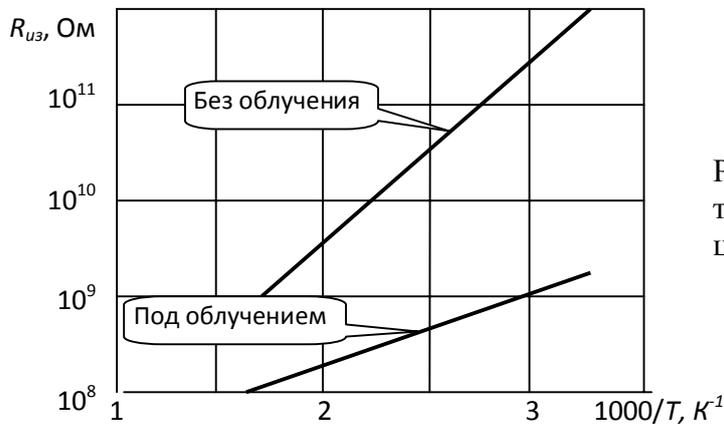


Рис. 3.60. Зависимость сопротивления минеральной изоляции от температуры

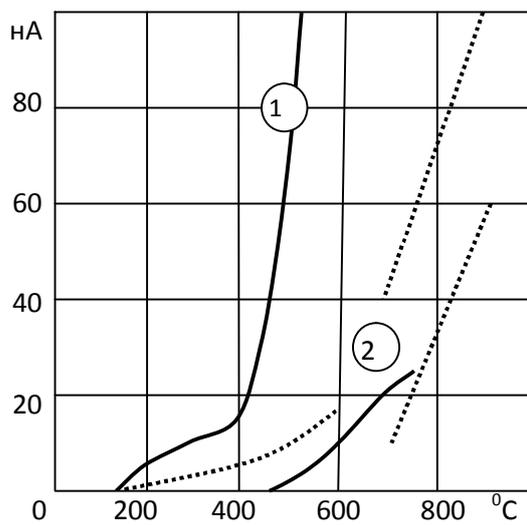


Рис.3.61. Термодиффузионные токи в кабеле с минеральной изоляцией: 1- негерметичный кабель без облучения; 2 – герметичный кабель без облучения (сплошная линия) и под ионизирующим облучением (пунктирные линии)

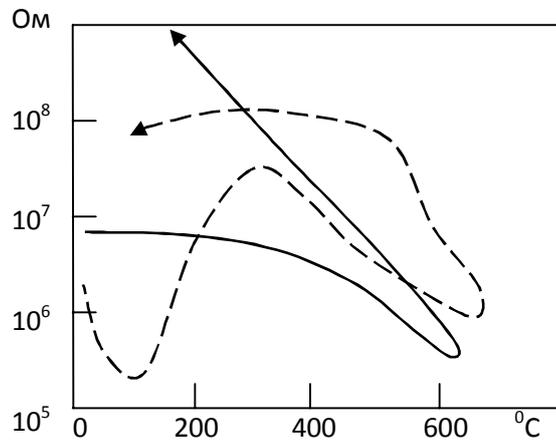


Рис. 3.62. Изменение электрического сопротивления негерметичного кабеля КНМС при нагревании - охлаждении со скоростями $\approx 400^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (сплошная линия) и $\approx 10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (пунктирная линия; охлаждение на воздухе со скоростью менее $75^{\circ}\text{C}/\text{мин}$)

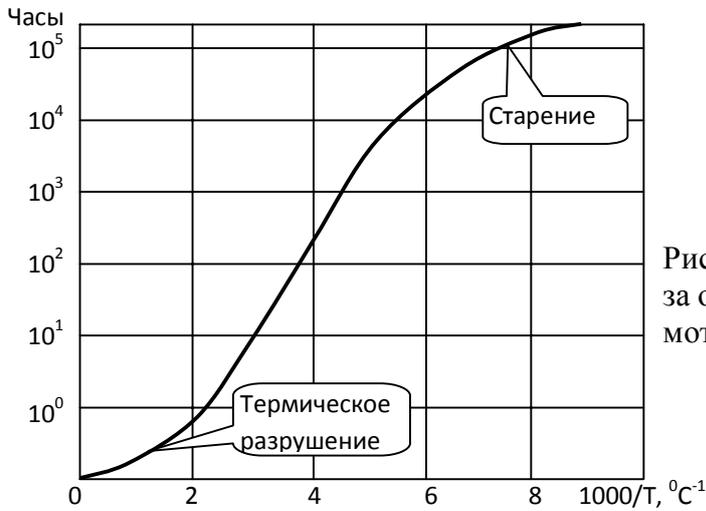


Рис. 3.63. Средняя наработка до отказа от температуры эксплуатации обмоточного провода

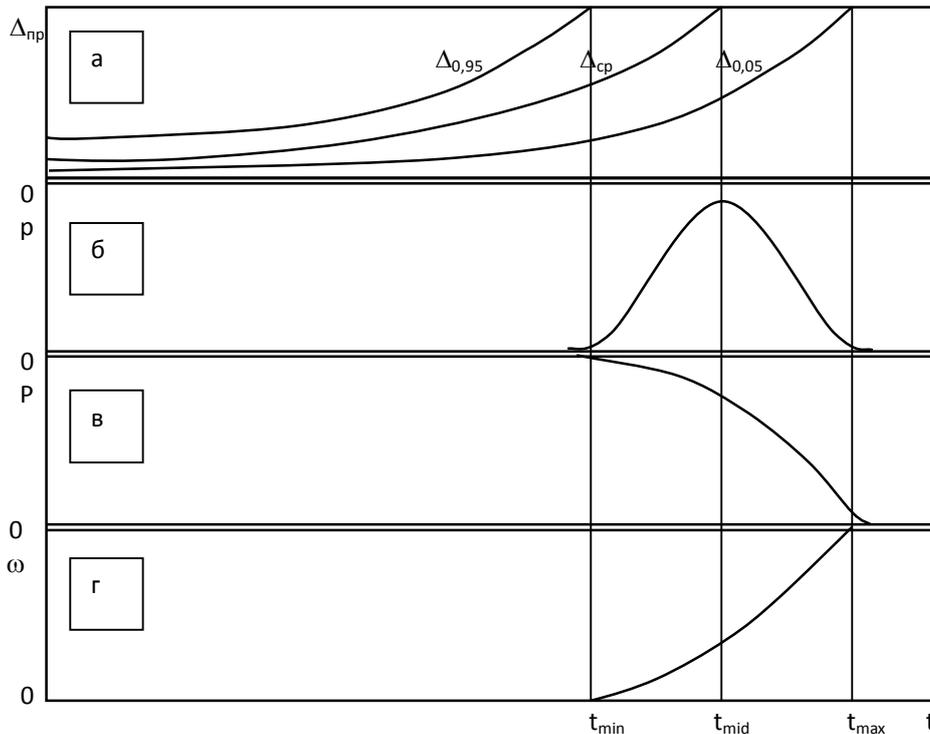


Рис.4.1. Модель состояния СИ во времени: а) – изменение погрешности $\Delta \leq \Delta_{пр}$; б) – плотность распределения p времени наработки до отказа (среднее и доверительные границы); в) – вероятность безотказной работы P ; г) – интенсивность метрологических отказов ω

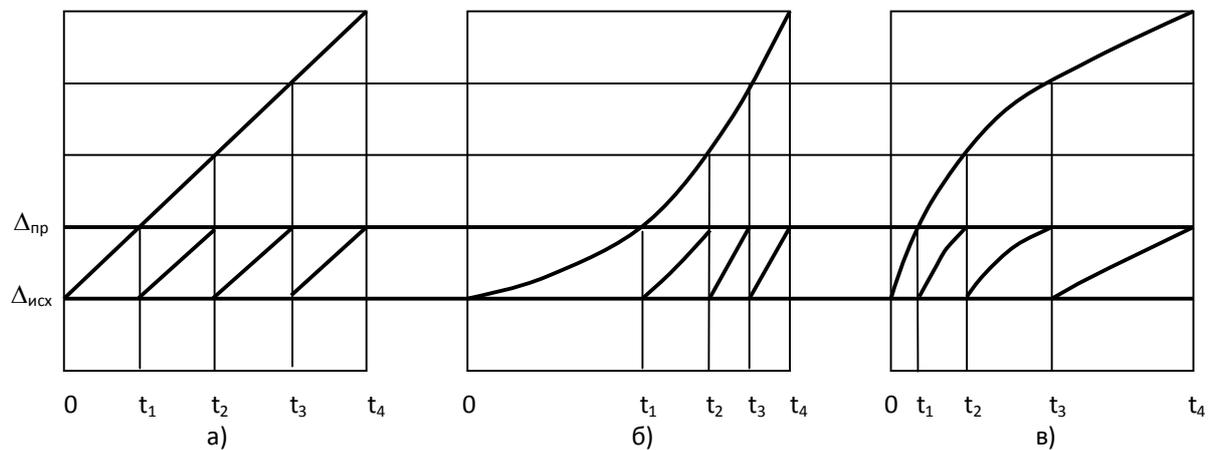


Рис.4.2. Функции изменения погрешности во времени: а) – линейная; б, в) – экспоненциальные

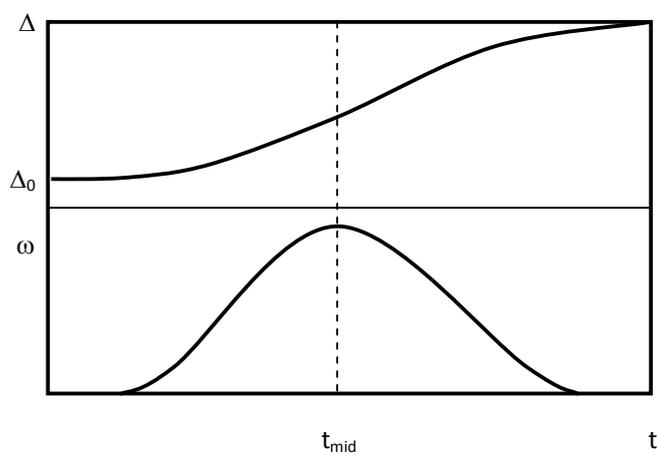


Рис.4.3. Логистическая модель изменения погрешности

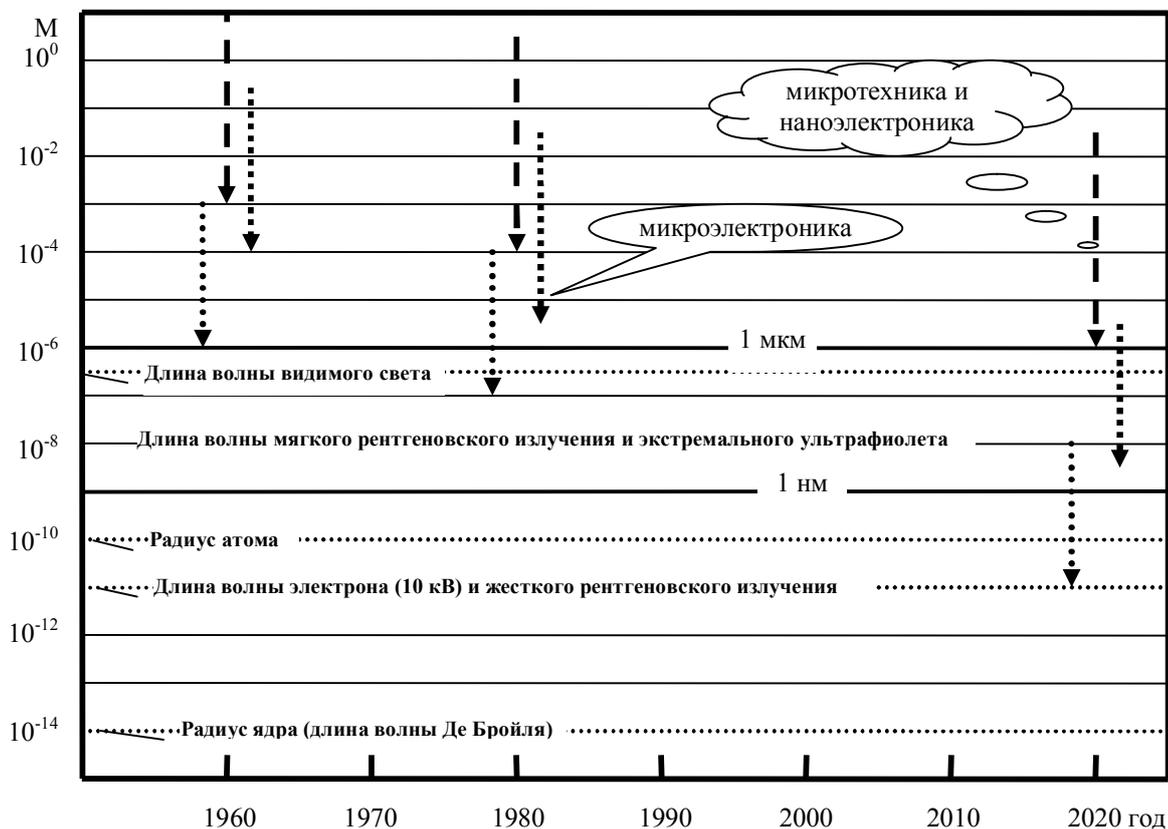


Рис. 5.1. Эволюция масштабов: механизмы и их детали (длинный пунктир), датчики и их элементы (короткий пунктир), требуемая точность (точки)

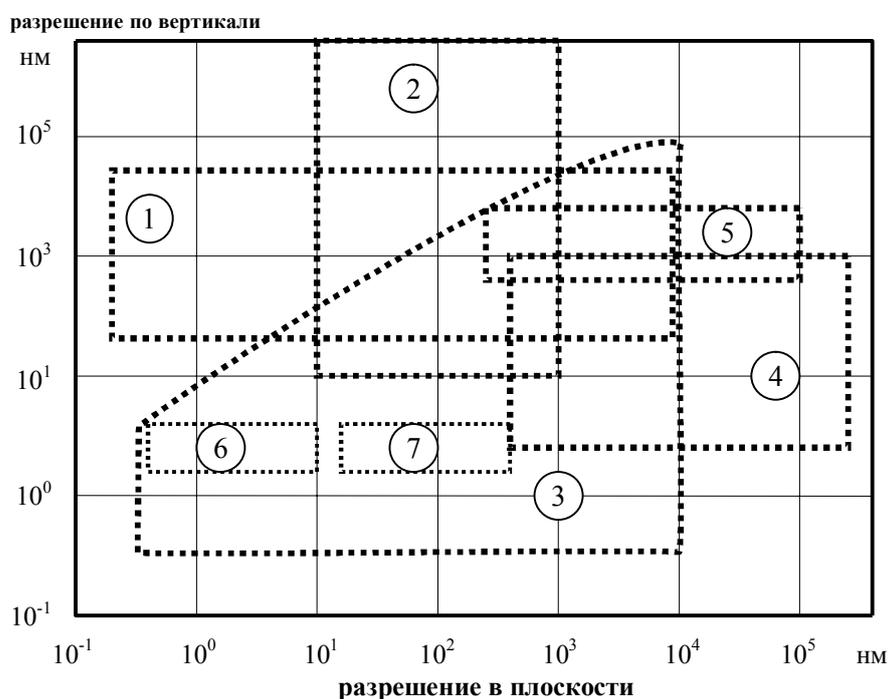


Рис.5.2. Пространственное разрешение в различных микроскопах: 1 – просвечивающий электронный; 2 – растровый электронный; 3 – сканирующий туннельный; 4 – фазоконтрастный; 5 – оптический высокого разрешения; 6 – ионный микропроектор; 7 – электронный микропроектор

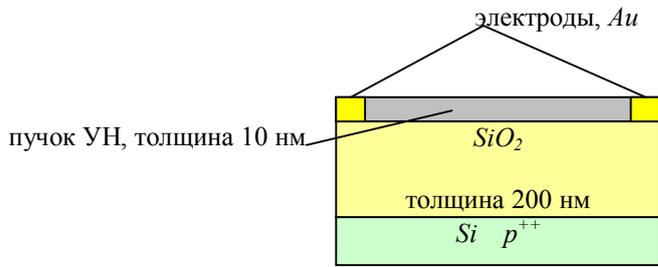


Рис.5.3. Структура транзистора на основе углеродных нанотрубок

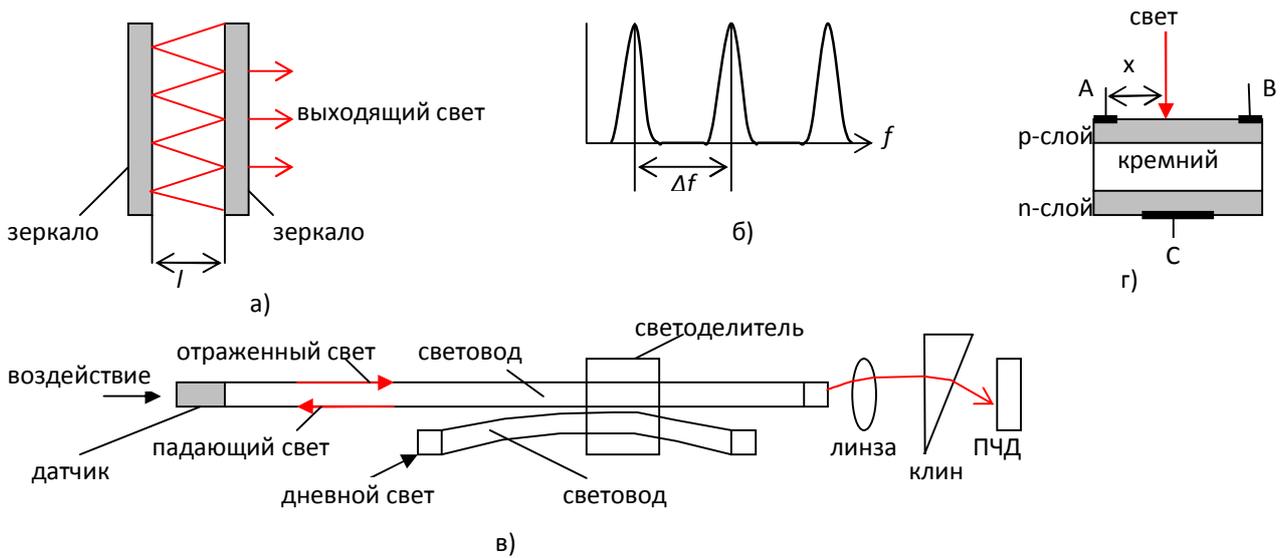


Рис. 5.4. Преобразователь малых перемещений Фабри-Перо: а) – схема резонатора Фабри-Перо; б) – частотная характеристика выходящего света; в) – датчик Фабри-Перо с оптоволоконным световодом и кремниевым позиционно чувствительным детектором (ПЧД); г) – схема ПЧД

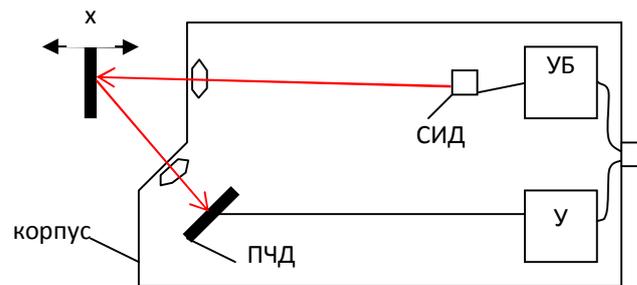


Рис. 5.5. Схема датчика перемещений: СИД – светоизлучающий диод; ПЧД –позиционно чувствительный детектор; УБ - управляющий блок; У - усилитель

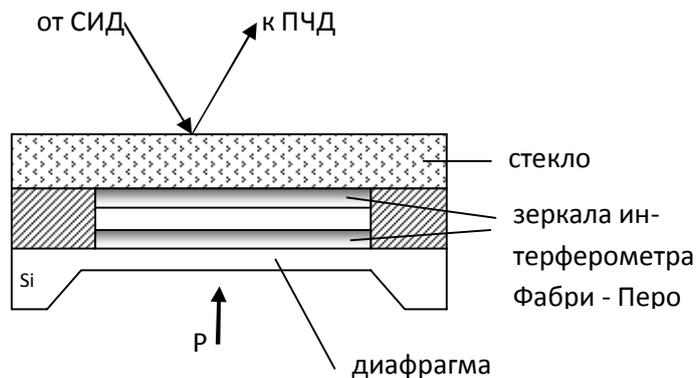


Рис. 5.6. Преобразователь давления на основе резонатора Фабри-Перо СИД – светоизлучающий диод ПЧД – позиционно чувствительный детектор

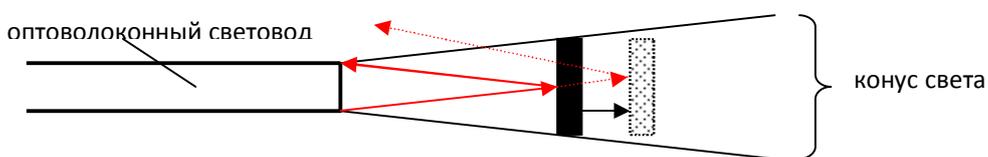


Рис. 5.7. Схема оптоволоконного датчика малых перемещений

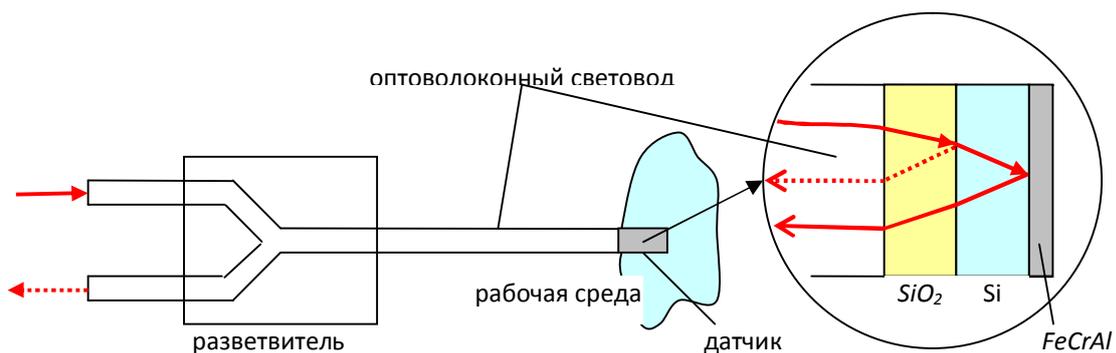


Рис. 5.8. Схема интерференционного датчика температуры

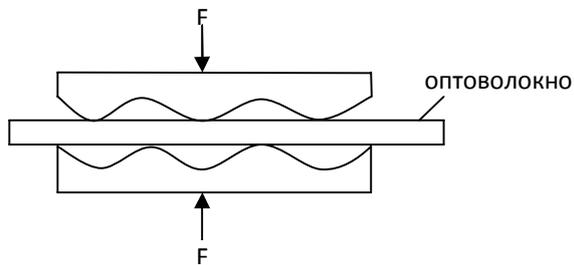


Рис. 5.9. Схема оптоволоконного преобразователя силы

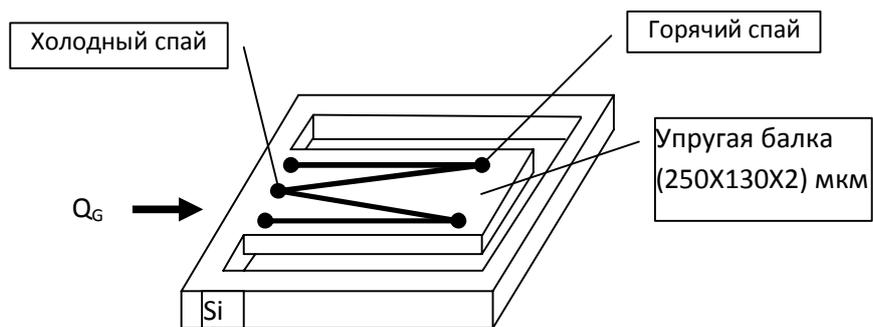


Рис. 5.10 Схема теплового преобразователя расхода газа

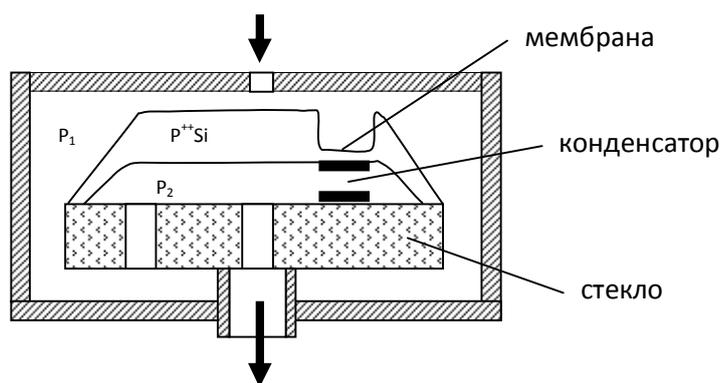


Рис. 5.11. Схема емкостного преобразователя микрорасхода