

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. А. СОЛОВЬЕВА»  
(РГАТУ имени П.А. Соловьева)

## ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ АСПИРАНТОВ

направление подготовки 09.06.01 Информатика и  
вычислительная техника

профиль подготовки 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной  
техники и систем управления»

# КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

Датчики технических параметров

Разработал: д.т.н. Юдин А. В.

Рыбинск, 2014 г.

Рассматриваются принципы функционирования датчиков технических параметров в составе систем управления. Особое внимание уделено подключению датчиков к устройствам сбора и обработки информации. Рассматриваются датчики механических перемещений, тензочувствительные датчики, датчики для измерения температуры и магнитных полей. Основы теории погрешности и чувствительности преобразователей.

## Содержание

Лекция 1. Датчики линейных и угловых перемещений .....	4
Лекция 2. Ультразвуковые датчики .....	10
Лекция 3. Тензочувствительные элементы, интегральные тензопреобразователи .....	11
Лекция 4. Термопары, источники погрешности и особенности подключения .....	14
Лекция 5. Терморезисторы, источники погрешности и особенности подключения .....	16
Лекция 6. Средства измерения напряженности магнитного поля .....	17
Лекция 7. Основы теории погрешности и чувствительности .....	18
Лекция 8. Методы математического описания чувствительности и точности средств преобразования .....	19

## Лекция 1. Датчики линейных и угловых перемещений

*Датчик перемещения* — это прибор, предназначенный для определения величины линейного или углового механического перемещения какого-либо объекта. Разумеется, подобные приборы имеют колоссальное количество практических применений в самых разнообразных областях, поэтому существует множество классов датчиков перемещения, которые различаются по принципу действия, точности, цене и прочим параметрам. Следует сразу отметить, что все датчики перемещения можно разделить на две основных категории — датчики линейного перемещения и датчики углового перемещения (энкодеры).

По принципу действия датчики перемещения могут быть: емкостными, оптическими, индуктивными, вихретоковыми, ультразвуковыми, магниторезистивными, потенциометрическими, магнитострикционными, на основе эффекта Холла

### Емкостные датчики перемещения

В основе работы датчиков данного типа лежит взаимосвязь ёмкости конденсатора с его геометрической конфигурацией. В простейшем случае речь идёт об изменении расстояния между пластинами вследствие внешнего физического воздействия (Рисунок 1). Поскольку ёмкость конденсатора изменяется обратно пропорционально величине зазора между пластинами, определение ёмкости при прочих известных параметрах позволяет судить о расстоянии между пластинами. Изменение ёмкости можно зафиксировать различными способами (например, измеряя его импеданс), однако в любом случае конденсатор необходимо включить в электрическую цепь.

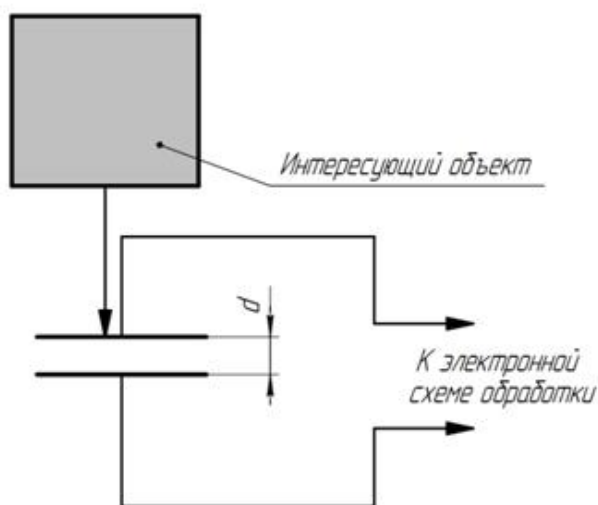


Рисунок 1. Емкостной датчик линейного перемещения с изменяющейся величиной зазора

Другой схемой, где выходным параметром является электрическая ёмкость, является схема, содержащая конденсатор с подвижным диэлектриком (Рисунок 2). Перемещение диэлектрической пластины между обкладками конденсатора также приводит к изменению его ёмкости. Пластина может быть механически связана с интересующим объектом, и в этом случае изменение ёмкости свидетельствует о перемещении объекта. Кроме того, если сам объект обладает свойствами диэлектрика и имеет подходящие габариты — он может быть использован непосредственно в качестве диэлектрической среды в конденсаторе.

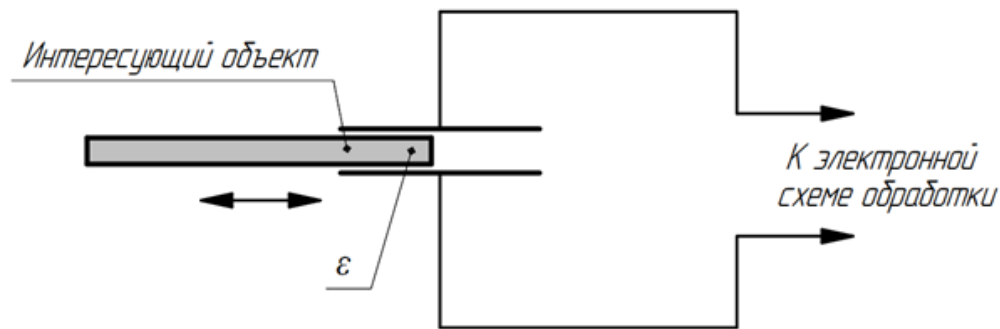


Рисунок 2. Емкостной датчик линейного перемещения с подвижным диэлектриком

### Оптические датчики перемещения

Существует множество вариаций схем датчиков перемещения, основанных на различных оптических эффектах. Пожалуй, наиболее популярной является схема оптической триангуляции — датчик положения является, по сути, дальномером, который определяет расстояние до интересующего объекта, фиксируя рассеянное поверхностью объекта излучение и определяя угол отражения, что даёт возможность определить длину  $d$  — расстояние до объекта (Рисунок 3). Важным достоинством большинства оптических датчиков является возможность производить бесконтактные измерения, кроме того такие датчики обычно довольно точны и имеют высокое быстродействие.

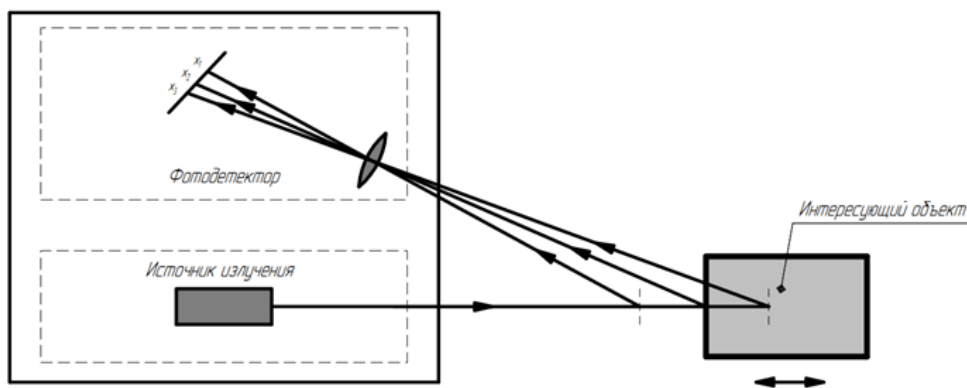


Рисунок 3. Оптический датчик перемещения на основе схему оптической триангуляции

В другой реализации оптического датчика, предназначенной для регистрации и определения параметров малых перемещений и вибраций, используется двойная решётчатая конструкция, а также источник света и фотодетектор (Рисунок 4). Одна решётка неподвижна, вторая подвижна и может быть механически закреплена на интересующем объекте или каким-либо способом передавать датчику его движение. Малое смещение подвижной решётки приводит к изменению интенсивности света, регистрируемой фотодетектором, причём с уменьшением периода решётки точность датчика возрастает, однако сужается его динамический диапазон.

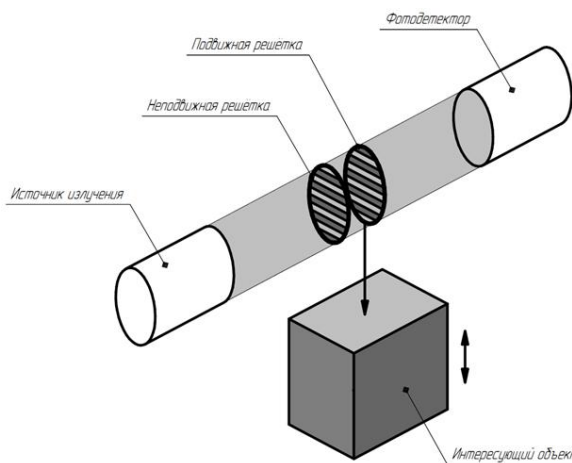


Рисунок 4. Оптический датчик перемещения на основе дифракционных решеток

Дополнительными возможностями применения обладают оптические датчики, учитывающие поляризацию света. В таких датчиках может быть реализован алгоритм селекции объектов по отражательным свойствам поверхности, т.е. датчик может «обращать внимание» только на объекты с хорошей отражающей способностью, прочие объекты игнорируются. Разумеется, чувствительность к поляризации негативно сказывается на стоимости подобных устройств.

#### Индуктивные датчики перемещения

В одной из конфигураций датчика данного типа чувствительным элементом является трансформатор с подвижным сердечником. Перемещение внешнего объекта приводит к перемещению сердечника, что вызывает изменение потокосцепления между первичной и вторичной обмотками трансформатора (Рисунок 5). Поскольку амплитуда сигнала во вторичной обмотке зависит от потокосцепления, по величине амплитуды вторичной обмотки можно судить о положении сердечника, а значит и о положении внешнего объекта.

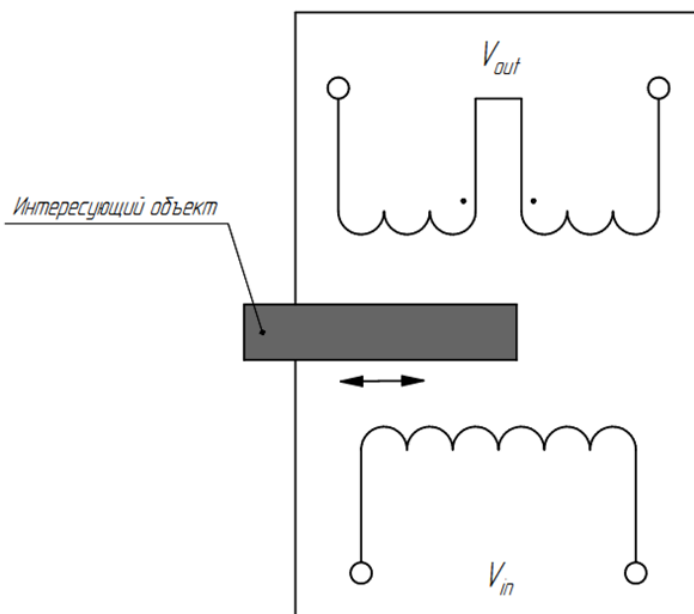


Рисунок 5. Индуктивный датчик перемещения на трансформаторе

Другая конфигурация имеет более простую схему, однако она пригодна лишь для небольшого количества приложений, где требуется определять незначительные перемещения или вибрации объектов, состоящих из ферромагнитного материала. В данной схеме интересующий ферромагнитный объект играет роль магнитопровода, положение которого влияет на индуктивность измерительной катушки (Рисунок 6).

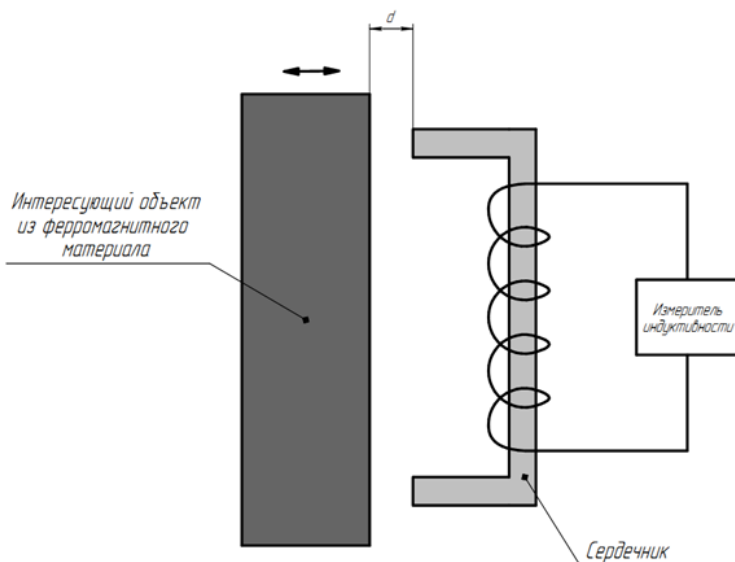


Рисунок 6. Индуктивный датчик перемещения для объектов из ферромагнитных материалов

### Вихретоковые датчики перемещения

Датчики данного типа содержат генератор магнитного поля и регистратор, с помощью которого определяется величина индукции вторичных магнитных полей. Вблизи интересующего объекта генератор создаёт магнитное поле, которое, пронизывая материал объекта, порождает в его объёме вихревые токи (токи Фуко), которые, в свою очередь, создают вторичное магнитное поле (Рисунок 7). Параметры вторичного поля определяются регистратором, и на их основании вычисляется расстояние до объекта, так как чем объект ближе, тем больший магнитный поток будет пронизывать его объём, что усилит вихревые токи и индукцию вторичного магнитного поля. Подобный принцип используется и в вихретоковых дефектоскопах, однако там на параметры вторичного магнитного поля влияет не расстояние до объекта, а наличие в его внутренней структуре скрытых несовершенств. Метод является бесконтактным, однако может применяться только для металлических тел.

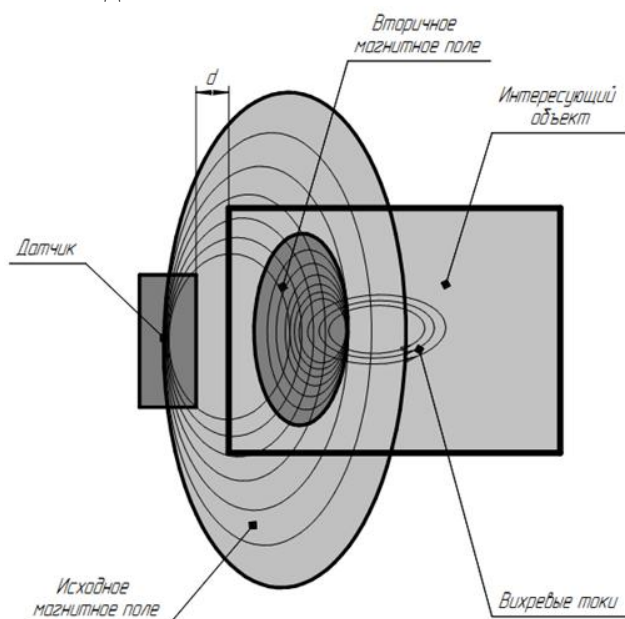


Рисунок 7. Вихретоковый датчик перемещения

### Магниторезистивные датчики перемещения

В магниторезистивных датчиках перемещения используется зависимость электрического сопротивления магниторезистивных пластинок от направления и величины индукции внешнего магнитного поля. Датчик, как правило, состоит из постоянного магнита и электрической схемы, содержащей включённые по мостовой схеме магниторезистивные пластины и источник постоянного напряжения (Рисунок 9). Интересующий объект, состоящий из ферромагнитного материала, перемещаясь в магнитном поле, изменяет его конфигурацию, вследствие чего изменяется сопротивление пластинок, и мостовая схема регистрирует рассогласование, по величине которого можно судить о положении объекта.

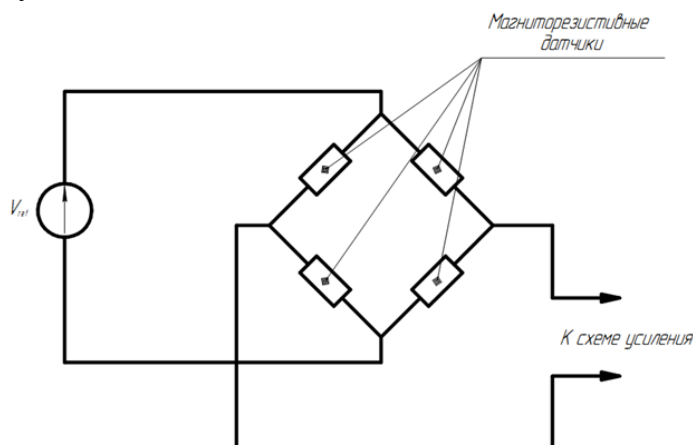


Рисунок 8. Магниторезистивный датчики перемещения

### Датчики на основе эффекта Холла

Датчики этого типа имеют конструкцию подобную конструкции магниторезистивных датчиков, однако в основу их работы положен эффект Холла — прохождение тока через проводник, на который воздействует внешнее магнитное поле, приводит к возникновению разности потенциалов в поперечном сечении проводника.

### Магнитострикционные датчики перемещения

Как правило, магнитострикционный датчик представляет собой протяжённый канал - волновод, вдоль которого может свободно перемещаться постоянный кольцевой магнит. Внутри волновода содержится проводник, способный при подаче на него электрических импульсов создавать магнитное поле вдоль всей своей длины (Рисунок 10). Полученное магнитное поле складывается с полем постоянного магнита, и результирующее поле создаёт момент вращения канала, содержащего волновод (эффект Вайдемана). Импульсы вращения распространяются по каналу в обе стороны со скоростью звука материала канала. Регистрация временной задержки между отправкой электрического импульса и приёма импульса вращения позволяет определить расстояние до постоянного магнита, т.е. определить его положение. Канал может иметь довольно большую длину (до нескольких метров), а положение магнита может быть определено с точностью до нескольких микрометров. Магнитострикционные датчики обладают отличной повторяемостью, разрешением, устойчивостью к неблагоприятным условиям и низкой чувствительностью к температурным изменениям.



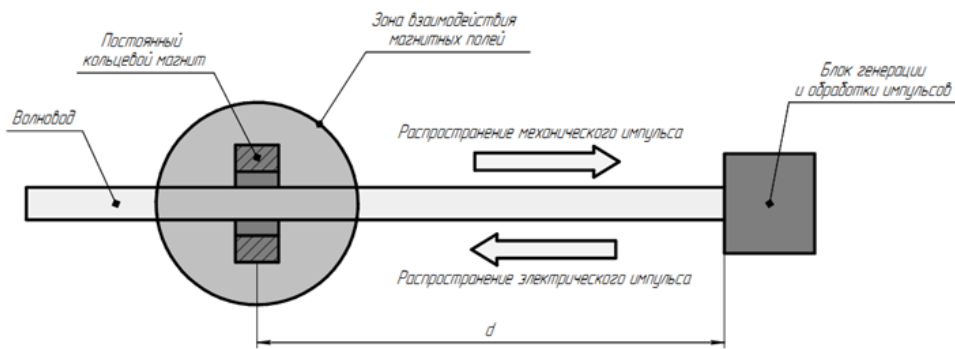


Рисунок 9. Магнитострикционный датчик перемещения

### Потенциометрические датчики перемещения

Датчик данного типа в своей основе имеет электрический контур, содержащий потенциометр (Рисунок 11). Линейное перемещение объекта приводит к изменению сопротивления потенциометра (переменного резистора). Если через потенциометр пропускать постоянный ток, то падение напряжения на нём будет пропорционально величине сопротивления, и, следовательно, величине линейного перемещения интересующего объекта.

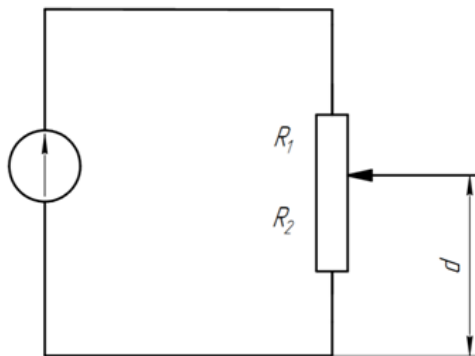
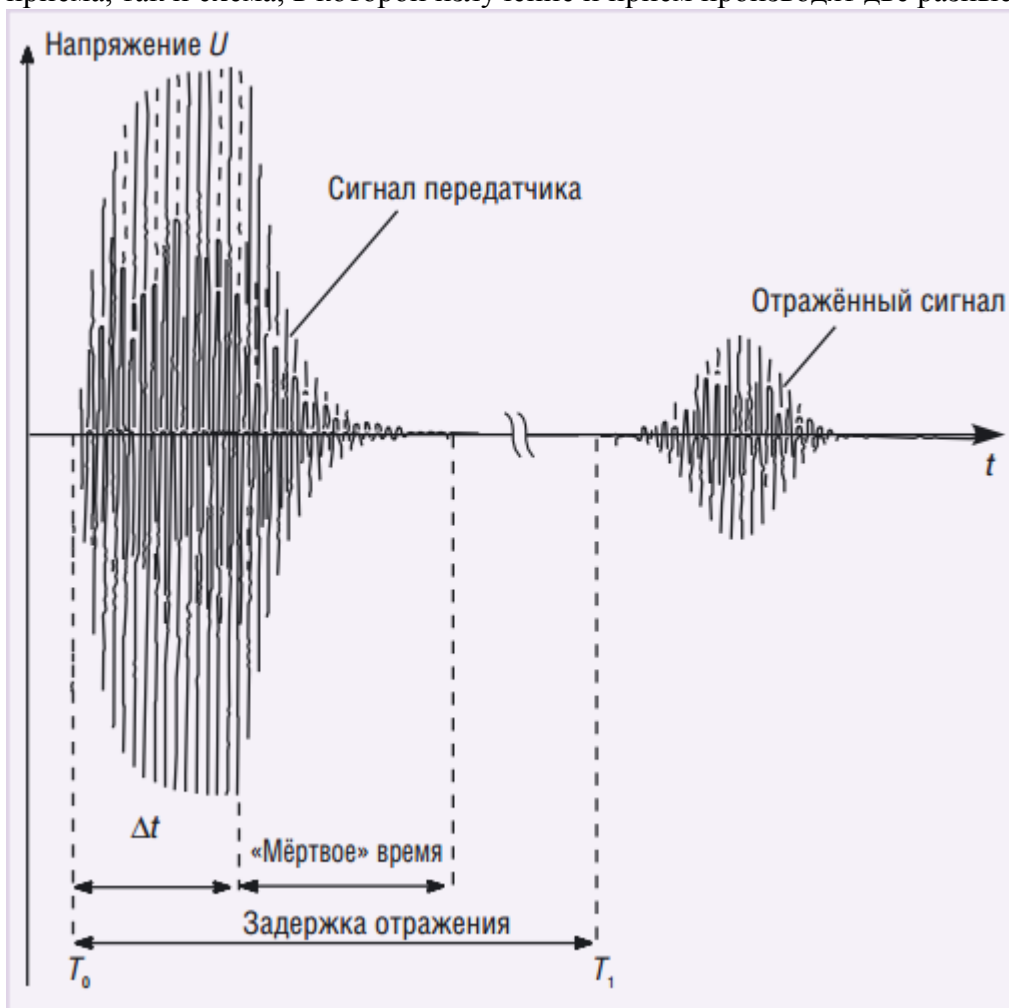


Рисунок 10. Потенциометрический датчик перемещения

Наряду с механическими датчиками перемещения, потенциометрические датчики получили наиболее широкое распространение в силу своей простоты и низкой стоимости, однако для универсальных, прецизионных и бесконтактных измерений в последнее время всё чаще используются датчики на основе оптических эффектов.

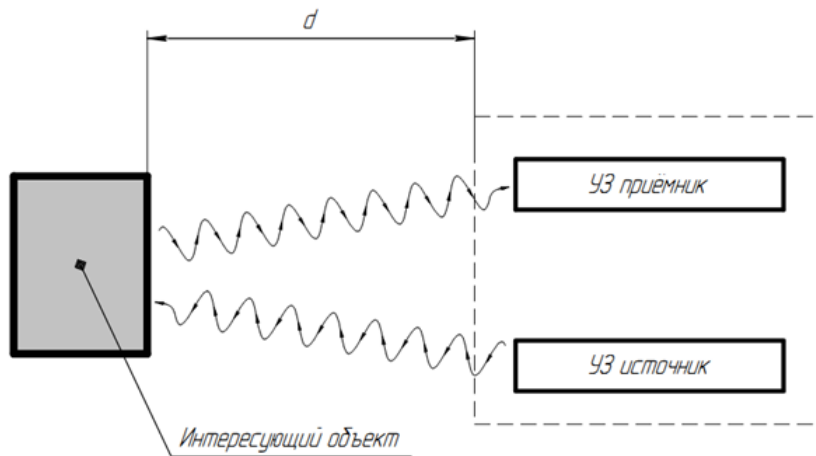
## Лекция 2. Ультразвуковые датчики

Принцип действия поясняется рисунком. В момент времени  $T_0$  ультразвуковой передатчик излучает сигнал, представляющий собой пачку импульсов продолжительностью  $\Delta t$ , которая распространяется в окружающей среде со скоростью звука. Когда сигнал достигает объекта, часть сигнала отражается и приходит в приёмник в момент времени  $T_1$ . Электронная схема устройства обработки сигнала определяет расстояние до объекта, измеряя время  $T_1 - T_0$ . Для измерений расстояния может применяться как схема, использующая одну и ту же головку датчика для излучения и приёма, так и схема, в которой излучение и приём производят две разные головки.



### Ультразвуковые датчики перемещения

В ультразвуковых датчиках реализован принцип радара — фиксируются отражённые от объекта ультразвуковые волны, поэтому структурная схема обычно представлена источником ультразвуковых волн и регистратором (Рисунок 8), которые обычно заключены в компактный корпус. Определение временной задержки между моментами отправки и приёма ультразвукового импульса позволяет измерять расстояние до объекта с точностью, достигающей до десятых долей миллиметра. Наряду с оптическими, ультразвуковые датчики на сегодняшний день являются, пожалуй, наиболее универсальным и технологичным бесконтактным средством измерения. Использование этого принципа измерений опять же можно найти в детекторах обнаружения дефектов, только на этот раз уже в ультразвуковых дефектоскопах.



Ультразвуковой датчик перемещения

### Лекция 3. Тензочувствительные элементы, интегральные тензопреобразователи

В основе работы тензорезисторных преобразователей лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при деформации сжатия – растяжения. При деформации проводника изменяются его длина  $l$  и площадь поперечного сечения  $Q$ ; при деформации кристаллической решетки – удельное сопротивление  $\rho$ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{Q}.$$

Важная характеристика тензоэффекта материала – коэффициент относительной чувствительности  $S_{\text{отн}}$ , определяемый как отношение изменения сопротивления к изменению длины проводника:

$$S_{\text{отн}} = \frac{\delta_R}{\delta_l},$$

где  $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$  – относительное изменение сопротивления проволоки;  $\delta_l = \frac{\Delta l}{l}$  – относительное изменение длины проводника.

Основным требованием к материалу тензопреобразователей является возможно большее значение коэффициента относительной чувствительности  $S_{\text{отн}}$ . Это объясняется тем, что относительное изменение сопротивления у большинства тензорезисторов мало, не превышает  $(5-7) \cdot 10^{-3}$ . Нагрев преобразователя может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением. Другое требование – возможно меньшее значение температурного коэффициента сопротивления материала, что определяет температурную погрешность преобразователя. Третье требование – это высокое удельное сопротивление материала, из которого изготавливается преобразователь, что необходимо для уменьшения габаритных размеров преобразователя. Наиболее часто применяемые для изготовления тензорезисторов материалы: константан, нихром,

манганин, никель, хромель, висмут, титаноалюминиевый сплав и полупроводниковые материалы (соединения германия, кремния и т. д.). В настоящее время наиболее широко применяют проволочные, фольговые, пленочные и полупроводниковые тензорезисторы.

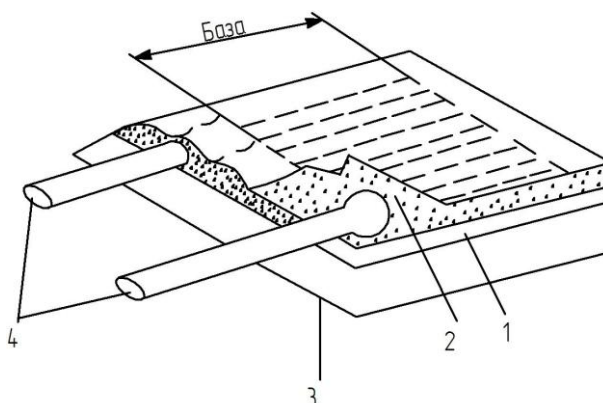
### Проволочные тензопреобразователи

В проволочных тензопреобразователях для измерений используются:

- тензоэффект проводника, находящегося в состоянии объемного сжатия, когда естественной входной величиной преобразователя является давление (газ или жидкость), а выходной – изменение активного сопротивления. На этом принципе строятся манометры для измерения высоких и сверхвысоких давлений;

- тензоэффект растягиваемой проволоки из тензочувствительного материала. При этом тензорезисторы применяются в виде «свободных» преобразователей и в виде наклеиваемых. «Свободные» тензопреобразователи выполняются в виде одной или группы проволок, закрепленных по концам между подвижной и неподвижной деталями, и, как правило, выполняющих одновременно роль упругого элемента. Естественной входной величиной является очень малое перемещение подвижной детали, а выходной величиной преобразователя – изменение его сопротивления. Устройство преобразователя приведено на рис. 2.40.

На полосу тонкой бумаги или лаковую пленку 7 наклеивается уложенная зигзагообразно тонкая проволока 2 диаметром 0,02–0,05 мм. К концам проволоки присоединяются (сваркой или пайкой) выводные медные проводники 4, служащие для включения преобразователя в измерительную цепь. Сверху преобразователь покрывается слоем лака или заклеивается бумагой 3 или фетром. Такой преобразователь приклеивается к испытуемой детали так, что проволока воспринимает деформацию поверхностного слоя испытуемой детали, вследствие чего изменяется сопротивление проволоки. Таким образом, естественной входной величиной является деформация поверхностного слоя испытуемой детали, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5 – 20 мм, обладающие сопротивлением 30 – 500 Ом. Кроме петлевой конструкции существуют и другие. При необходимости уменьшения измерительной базы преобразователя (до 3 – 1 мм) тензорезистор изготавливают витковым способом, который заключается в том, что на оправке круглого сечения на трубку из тонкой бумаги наматывается спираль из тензочувствительной проволоки. Затем эта трубка проклеивается, снимается с оправки, расплющивается и к ее концам прикрепляются выводы.



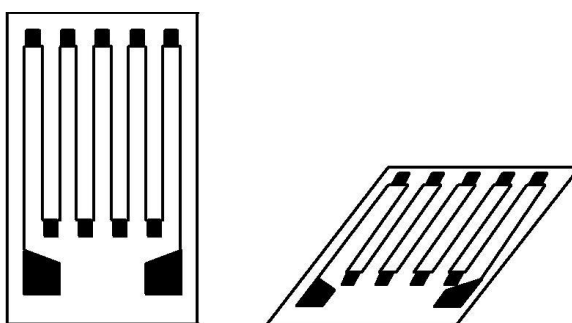
Устройство наклеиваемого проволочного тензорезистора:

1 – лаковая пленка; 2 – проволока; 3 – бумага; 4 – медные проводники.

Когда надо получить от цепи с тензопреобразователем ток большой величины (например, при работе на вибраторе осциллографа), используют проволочные преобразователи из большого числа (30 – 50) параллельно соединенных проволочек. Они отличаются большими габаритными размерами (длина базы 150 – 200 мм), но дают возможность увеличить пропускаемый через преобразователь ток.

Фольговые преобразователи

Они представляют собой тонкую лаковую пленку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решетка из константана толщиной 4 – 12 мкм. При изготовлении таких преобразователей путем травления можно получить любой рисунок решетки, что является достоинством фольговых преобразователей. На рис. 2.41 представлены разновидности фольговых тензорезисторов.



Фольговые тензорезисторы

Большим преимуществом фольговых преобразователей является возможность увеличивать сечение их концов, что позволяет осуществить надежное припаивание (приваривание) выводов, а также возможность изготовить фольговые преобразователи большего сечения, чем проволочные, что позволяет пропускать через преобразователи большие токи, и, следовательно, делать приборы с тензопреобразователями более чувствительными.

При отношении ширины к толщине полоски, равном 10, допустимый ток в преобразователе из фольги в 1,4 раза больше, чем в преобразователе из проволоки того же сечения.

Пленочные тензорезисторы

Металлические пленочные тензорезисторы изготавливаются методом вакуумной возгонки тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку (рис. 2.42). Форма тензорезистора задается маской, через которую производится напыление.

Действие датчика основано на изменении омического сопротивления тензочувствительной обмотки 2 при деформации упругого элемента 1 под воздействием измеряемой силы. Тензочувствительная обмотка (напыленная или намотанная из константана) включается в плечо мостовой схемы.

Чаще всего измерительной цепью является делитель напряжения либо мостовая цепь.

Делитель напряжения с питанием постоянным током (см. рис. 2.43, а) применяют лишь в том случае, когда интересуются только переменной составляющей измеряемой величины. При этом постоянная составляющая падения напряжения на сопротивлении  $R_{\text{п}}$  тензопреобразователя, в сотни раз превышающая переменную составляющую,

отфильтровывается разделительным конденсатором  $C$ . В других случаях в качестве измерительной цепи используется цепь моста (см. рис. 2.43, б), питаемого постоянным или переменным током. Чаще применяется неравновесный режим работы мостовой цепи. При динамических измерениях в качестве указателя применяют самописец или осциллограф, включаемые через усилитель.

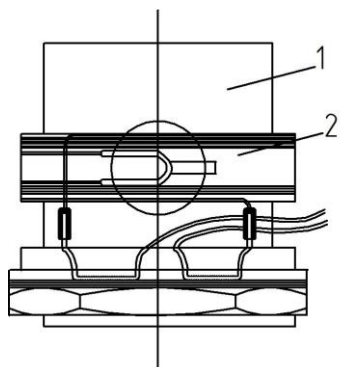


Рис. 2.42. Пленочные тензорезисторы:  
1 – упругий элемент; 2 – обмотка

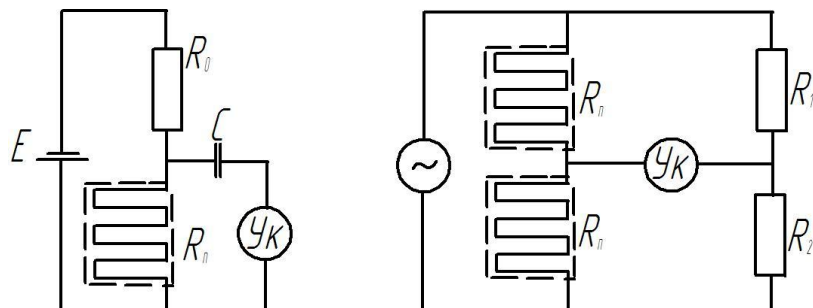


Рис. 2.43. Схемы включения тензорезисторов: а – делитель напряжения; б – мостовая цепь

#### Полупроводниковые тензорезисторы

Полупроводниковый чувствительный элемент в полупроводниковых тензорезисторах состоит из кремниевой полоски с n- или p-проводимостью, обладающей пьезоэффектом, при котором механическая нагрузка вызывает положительное или отрицательное изменение сопротивления. Полупроводниковый тензорезистор шириной 0,2 мм и толщиной около 0,02 мм может быть изготовлен на подложке или использоваться без нее. Преимуществом таких тензодатчиков является высокая чувствительность, которая

постоянна только в узком диапазоне. Его характеристика нелинейна, величина  $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$

сильно изменяется при изменении удлинения  $\delta_l = \frac{\Delta l}{l}$  и температуры.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют высокую стоимость, что учитывается при их использовании.

### Лекция 4. Термопары, источники погрешности и особенности подключения

Принцип их действия основан на явлении термоэлектричества. Если составить цепь из двух различных проводников (или полупроводников)  $A$  и  $B$  и соединить их между собой концами (рис. 3.21, а), причем температуру  $t_1$ , одного места соединения сделать отличной от температуры  $t_0$  другого, в цепи появится ЭДС, называемая *термоэлектродвижущей силой* (термоЭДС). Она является следствием разности функций температур мест соединения проводников:

$$E_{AB}(t_1, t_2) = f(t_1) - f(t_2). \quad (3.19)$$

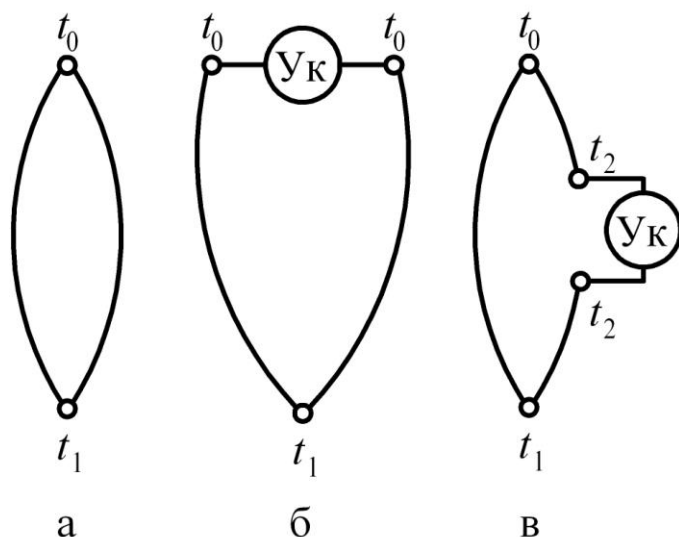
Данная цепь называется *термоэлектрическим преобразователем* или *термопарой*; проводники, составляющие термопару – *термоэлектродами*, а места их соединения –

спаями.

Термопару можно использовать для измерения температуры. Если один спай термопары (рабочий спай) поместить в среду с температурой  $t_1$  которую нужно измерить, а температуру другого (нерабочего) спаев поддерживать постоянной  $f(t_0) = \text{const}$ , то

$$E_{AB}(t_1, t_0) = f(t_1) - f(t_0) = f_1(t_1).$$

Последнее выражение положено в основу измерения температур при помощи термопар.



#### Термоэлектрические преобразователи

Таким образом, входной величиной термопары является температура  $t_1$  рабочего спаев, а выходной величиной – термоЭДС, которую термопара развивает при строго постоянной температуре  $t_0$  нерабочего спаев.

Приборы, представляющие собой сочетание термопары и измерителя, используемые для измерения температуры, называются *термоэлектрическими пирометрами*.

Включить измеритель (указатель) в цепь термопары можно по двум схемам (рис. 3.21, б, в), а для того чтобы включение в цепь термопары указателя не изменило значения термоЭДС, места соединения указателя с термоэлектродами должны иметь одинаковую температуру.

Для измерения температур до  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  используют термопары в основном из неблагородных металлов, для измерения температур свыше  $1100\text{--}1600\text{ }^\circ\text{C}$  – термопары из благородных металлов платиновой группы, а для измерения температур более  $1600\text{ }^\circ\text{C}$  – термопары из жароупорных материалов (вольфрам – молибден). Направление термоЭДС зависит лишь от природы материалов, используемых в качестве термоэлектродов. Положительным называют тот термоэлектрод, по направлению к которому ток идет через рабочий спай термопары.

#### ***Погрешности термоэлектрических преобразователей и методы их коррекции.***

Погрешность, обусловленная изменением температуры нерабочих спаев термопары. Градуировка термопар осуществляется при температуре нерабочих спаев, равной нулю. Если при практическом использовании термопары температура нерабочих спаев будет отличаться от  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , это вызовет появление погрешности измерения. Для ее устранения нерабочие спаи термостатируют в ванне с тающим льдом, т. е. при  $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .

Такой способ не всегда применим. Следует термостатировать нерабочие спаи, чтобы температура их либо сохранялась постоянной во времени, либо изменялась возможно медленнее при изменении окружающей температуры. Термостатирование осуществляется либо погружением рабочих спаев на достаточную глубину в землю, что обеспечивает постоянство температуры в течение года, либо помещением их в массивную коробку с тепловой изоляцией, снабженную ртутным термометром и двумя штуцерами для ввода удлинительных и медных проводов. Обладая большой тепловой инерцией, коробка достаточно медленно реагирует на изменение внешней температуры.

Наиболее радикальным средством стабилизации температуры нерабочего спая является автоматическое термостатирование с электрическим подогревом. Если температура нерабочего спая известна, внести соответствующую поправку к показаниям термоэлектрического термометра можно следующим образом. Пусть имеется градуировочная кривая термопары  $E = f(t)$  (рис. 3.23).

Градуировка термопары производилась при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Положим, что термопарой нужно измерить температуру  $t$  при температуре нерабочих спаев  $t'_0$  и большей, чем  $t_0$ . ТермоЭДС  $E(t, t'_0)$  термопары в этом случае будет меньше термоЭДС  $E(t, t_0)$ , которая была бы при той же температуре  $t$  рабочего спая, но при температуре нерабочих спаев  $t_0$ . ТермоЭДС термопары уменьшится на величину  $E(t'_0, t_0)$  и окажется равной (см. рис. 3.23) термоЭДС  $E(t'_0, t_0)$ , которая была бы при температуре нерабочего спая, равной  $t'$ , и температуре рабочего спая, равной  $t'_0$ , т. е.

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

## Лекция 5. Терморезисторы, источники погрешности и особенности подключения

Терморезисторы (термисторы) - это резисторы, сопротивление которых сильно изменяется в зависимости от температуры. Термисторы с положительным температурным коэффициентам сопротивления (ТКС) называются позисторами. Благодаря чувствительности к температуре термисторы используются для измерения температуры и построения систем управления температурой в технологическом и лабораторном оборудовании.

Термисторы имеют нелинейную вольт-амперную характеристику и очень высокую температурную чувствительность по сравнению с другими типами датчиков температуры. Типовое значение ТКС для термисторов составляет -5% на градус, в то время как для платинового термопреобразователя (RTD) он составляет 0,4% на градус.

Типовой диапазон температур термисторов достаточно узок (-60...+150 С), для некоторых образцов он расширен до (-60...+300 С). Важным преимуществом термисторов является их большое сопротивление, что устраняет проблему, связанную с падением напряжения на подводящих проводах.

### *Температурная зависимость*

Зависимость сопротивления термисторов от температуры в диапазоне нескольких десятков градусов удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией (рис. 1)

$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right)$$

где  $A$  - сопротивление при бесконечно большой температуре,  $B$  - коэффициент температурной чувствительности (его значения обычно лежат в диапазоне 1200-16000).



## Лекция 6. Средства измерения напряженности магнитного поля

Измерение магнитной индукции и напряженности магнитного поля в постоянных и переменных полях выполняются с помощью тесламетров с преобразователями Холла. При помещении такого преобразователя в магнитное поле на боковых его гранях генерируется ЭДС.

Выпускаемые промышленностью тесламетры данного типа предназначены для измерений магнитной индукции в пределах  $0,002 \dots 2$  Т, с частотным диапазоном до 1 ГГц. К их достоинствам можно отнести простоту конструкции, удобство в эксплуатации, высокие метрологические характеристики. Недостатки: показания прибора зависят от температуры.

В ядерно-резонансных тесламетрах в качестве преобразователя применяется разновидность квантового магнитоизмерительного преобразователя, действие которого основано на взаимодействии атомов, ядер атомов с магнитным полем. Диапазон измерения таких устройств достигает 10Т при классе точности измерений в пределах  $0,001 \dots 0,1$ .

Ферромодуляционные тесламетры предназначены для малых постоянных и переменных низкочастотных магнитных полей. Принцип их работы основан на явлении сверхпроводимости и позволяет производить измерения магнитного поля, создаваемого биотоками сердца, мозга человека. Напряженность магнитного поля в таких устройствах измеряют электродинамическим способом, основанным на взаимодействии тока, протекающего по рамке, с измеряемым магнитным полем. О значении напряженности поля судят по углу отклонения рамки, помещенной в измеряемое магнитное поле, при неизменном значении тока в ней.

Магнитные материалы делят на три группы: магнитомягкие; магнитотвердые; материалы со специальными свойствами. Статические и динамические характеристики магнитных материалов и методы их определения регламентируются соответствующими ГОСТами и стандартами.

Аппаратура для определения характеристик и параметров магнитных материалов состоит из намагничивающих и измерительных обмоток, средств измерения, регистрации, обработки полученной информации и различных вспомогательных устройств. В промышленных установках для определения статических характеристик магнитных материалов определяют индукцию с помощью индукционно-импульсного метода, а напряженность поля косвенно по силе тока в намагничивающей катушке и ее параметрам или с помощью магнитоизмерительных приборов. В установках для определения динамических характеристик магнитных материалов обычно используют индукционный магнитоизмерительный преобразователь и различные способы измерения его выходного сигнала.

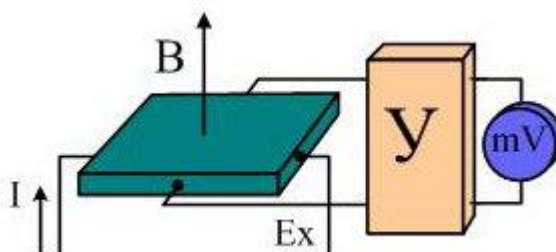
Испытание магнитных материалов стремятся проводить при равномерном намагничивании материала, когда индукция в различных сечениях образца одинакова. Для испытания магнитного материала в замкнутой магнитной цепи используют образцы в виде кольца, что обеспечивает наибольшую точность измерения. Но изготовление таких образцов – сложное дело, поэтому гораздо проще испытывать образцы материалов в виде полос, стержней с помощью специальных устройств – пермеаметров.

Основные статические характеристики материалов определяются в постоянных магнитных полях и позволяют отличать один материал от другого. К ним относятся: основная кривая намагничивания и петля гистерезисного цикла, площадь которой пропорциональна энергии, затрачиваемой на перемагничивание, а точки пересечения с осями координат позволяют определить основные магнитные характеристики материалов. Наиболее распространенный способ определения статических характеристик –

индукционно-импульсный метод с использованием баллистического гальванометра и веберметра.

Динамические характеристики зависят не только от качества самого материала, но и от формы и размеров образца, формы кривой и частоты намагничивающего поля. Динамическая петля гистерезиса и ее площадь определяют полную энергию, рассеиваемую за цикл перемагничивания, т.е. потери за счет гистерезисных явлений, вихревых токов, магнитной вязкости и т.п. Семейство динамических петель характеризует магнитный материал при данных размерах образца, форме и частоте магнитного поля. Геометрическое место вершины динамических петель является динамической кривой намагничивания. Важными параметрами магнитных материалов в переменных магнитных полях являются различные виды магнитной проницаемости.

Приборы для измерения напряженности магнитного поля (далее - *МП*) называются *гауссметрами*. Наиболее часто в приборах этого типа используют преобразователи Холла, как это показано на рисунке



## Лекция 7. Основы теории погрешности и чувствительности

Выполняющий измерительное преобразование датчик работает в реальных производственных условиях эксплуатации, зачастую весьма тяжелых, связанных с высокими давлениями и температурами при влиянии агрессивных сред. На датчик одновременно воздействует большое число параметров. Среди этих параметров только один является измеряемой величиной, а все остальные представляют собой внешние параметры, характеризующие производственную среду. Эти внешние параметры являются в данном случае помехами. Каждый датчик должен на фоне помех наилучшим образом реагировать на измеряемую входную величину, вырабатывая соответствующую выходную величину или код выходной величины. При построении датчиков используются различные физические принципы, которые в значительной степени определяют области рационального применения того или иного датчика.

*Функция преобразования датчика* - это зависимость выходной величины данного измерительного преобразователя от входной, задаваемая либо аналитическим выражением, либо графиком, либо таблицей.

*Чувствительность датчика* - это именованная величина, показывающая, насколько изменится выходная величина при изменении входной величины на одну единицу. Для термопары единицей чувствительности будет мВ/К (милливольты на 1 градус Кельвина), для регулируемого электродвигателя - обороты в секунду на 1 вольт и т.д.

*Разрешающая способность преобразования* - это наименьшее изменение входного сигнала, которое может быть измерено преобразователем.

*Точность (погрешность) измерения* показывает, насколько показанное датчиком значение параметра близко к его истинному значению. Обычно точность задается в процентах от полной шкалы измерительного прибора и в результате представляет собой некоторую абсолютную величину.

Различают статическую и динамическую характеристики датчика. Под статической характеристикой датчика понимают зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин. Под динамической характеристикой датчика понимают поведение выходной величины во время переходного процесса в ответ на мгновенное (ступенчатое) изменение измеряемой входной величины.

Если в статической характеристике датчика строится зависимость только между значением выходной величины  $Y$  в ответ на изменение входной величины  $X$ , то в динамической характеристике датчика участвует параметр времени  $t$  и такая характеристика представляет собой зависимость вида  $Y = Y(t)$ . Очевидно, что установившееся значение выходной величины датчика представляет собой то значение, которое приобретает его выходная величина после окончания всех переходных процессов, т.е. при  $t$  стремящимся к бесконечности. Зависимость между установившимися значениями входной и выходной величин применительно к датчикам называется тарировочной кривой.

## **Лекция 8. Методы математического описания чувствительности и точности средств преобразования**

Пусть известен аналитический вид зависимости выходного параметра  $y$  от совокупности из  $n$  входных параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Обозначим ее

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

или в векторной форме

$$y = f(X), \text{ где } X = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Для упрощения анализа сделаем ряд допущений относительно свойств этой функции и входных параметрах.

*Первое допущение.* Областью определения функции (1) является куб  $n$ -мерного пространства. Обозначим его  $Q_X$ .

*Второе допущение.* Функция (1) дифференцируема в области своего определения.

*Третье допущение.* Отклонения всех входных параметров относительно своих номинальных значений малы.

*Четвертое допущение.* Каждый из входных параметров является случайной величиной, распределенной по нормальному закону.

Все входные параметры  $X$  является случайной величиной, распределенные по законам  $\varphi_1(x_1), \varphi_2(x_2), \dots, \varphi_n(x_n)$  с математическими ожиданиями, равными их номинальным значениям  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}$  и дисперсиями  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ .

Представим входные параметры в виде сумм их номинальных значений и абсолютных отклонений  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ , имеющих нулевые математические ожидания, т.е.

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{10} + \varepsilon_1 \\ x_2 &= x_{20} + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ x_n &= x_{n0} + \varepsilon_n \end{aligned} \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует

$$y = f(x_{10} + \varepsilon_1, x_{20} + \varepsilon_2, \dots, x_{n0} + \varepsilon_n). \quad (3)$$

В соответствии со вторым и третьим допущениями разложим (3) в ряд Тейлора, оставив в нем постоянную составляющую и линейные члены. При этом получим приближенное соотношение

$$y = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \varepsilon_n \quad (4)$$

Обозначим

$$y_0 = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует уравнение погрешностей

$$y - y_0 = \eta = \frac{\partial f}{\partial x_1} \varepsilon_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \varepsilon_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \varepsilon_n \quad (6)$$

Из четвертого допущения следует, что математическое ожидание абсолютного отклонения выходного параметра  $\eta$ , как и математические ожидания абсолютных отклонений входных параметров  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$  равны нулю. Дисперсии же этих абсолютных отклонений связаны соотношением

$$D(\eta) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} D(\varepsilon_i) \quad (7)$$

С учетом связи дисперсии со среднеквадратическим отклонением из (7) получим

$$\sigma(\eta) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma^2(\varepsilon_i)} \quad (8)$$

Поскольку при нормальных законах распределения допуски на параметры  $\Delta y, \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  связаны с их среднеквадратическими отклонениями линейными соотношениями

$$\begin{aligned} \Delta y &= 3\sigma(\eta) \\ \Delta x_1 &= 3\sigma(\varepsilon_1) \\ \Delta x_2 &= 3\sigma(\varepsilon_2) \\ &\dots \\ \Delta x_n &= 3\sigma(\varepsilon_n) \end{aligned} \quad (9)$$

из (8) и (9) получим уравнение допусков

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} \Delta x_i \quad (10)$$

Вследствие того, что в ряде случаев отклонения величин иногда бывает удобнее представлять в относительных величинах, возможны различные формы записи (6), приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Откл. входных пар-ров	Отклонения выходного параметра	
	Абсолютные	Относительные

Абсолютные	$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \varepsilon_i$	$\frac{\eta}{y} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{f}}{\frac{\partial x_i}{x_i}} \right) \varepsilon_i$
Относительные	$\eta = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\frac{\partial x_i}{x_i}}}{\frac{x_i}{x_i}} \right) \frac{\varepsilon_i}{x_i}$	$\frac{\eta}{y} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{f}}{\frac{\partial x_i}{x_i}} \right) \frac{\varepsilon_i}{x_i}$

Возможны и другие формы записи уравнения погрешности. Если погрешность входных параметров или выходного параметра оценивается относительно каких-то фиксированных значений  $X_i$ ,  $Y$  (значения за период или какой-то фиксированный интервал, максимально возможные значения и т.д.). Назовем эти погрешности приведенными. По аналогии с данными таблицы 1 могут быть предложены формы записи уравнения, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Откл. входных пар-ров	Отклонения выходного параметра	
	Абсолютные	Приведенные
Абсолютные	$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \varepsilon_i$	$\frac{\eta}{Y} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{Y}}{\frac{\partial x_i}{x_i}} \right) \varepsilon_i$
Приведенные	$\eta = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\frac{\partial x_i}{X_i}}}{\frac{X_i}{X_i}} \right) \frac{\varepsilon_i}{X_i}$	$\frac{\eta}{Y} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{Y}}{\frac{\partial x_i}{X_i}} \right) \frac{\varepsilon_i}{X_i}$

Применение той или иной формы представления уравнения погрешностей зависит от конкретных особенностей исследуемого процесса. Рассмотрим конкретные примеры.

Если изменение входного или выходного параметра представляет собой бесконечный процесс, то применение относительных погрешностей становится нецелесообразным, поскольку по мере возрастания параметров они стремятся к нулю. В этом случае более удобным следует считать применение приведенных погрешностей. При этом, если бесконечны процесс к тому же является и периодический, то в качестве величин, к которым производится приведение, следует брать сами периоды.

Если в качестве параметров процесса выступают величины, допуски на которые нормированы процентными отклонениями относительно номинальных значений (сопротивления резисторов, емкости электрических конденсаторов, индуктивности катушек и т.д.), то целесообразным следует считать применение уравнения с относительными погрешностями.

Если в процессе своего изменения параметры могут принимать нулевые значения, то применения относительных погрешностей следует избегать, так как в моменты, соответствующие нулевым значениям параметров они будут бесконечно большими.

По аналогии с уравнением погрешностей, приведенных в таблицах 1 и 2 могут быть составлены различные формы уравнений допусков, приведенные в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Допуски на вх. пар-ры	Допуск на выходной параметр	
	Абсолютный	Относительный
Абсолютные	$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2}$	$\frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}}{f} \right)^2 \Delta x_i^2}$
Относительные	$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}}{x_i} \right)^2 \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2}$	$\frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}}{\frac{f}{x_i}} \right)^2 \left( \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2}$

Таблица 4

Допуски на вх. пар-ры	Допуск на выходной параметр	
	Абсолютный	Приведенный
Абсолютные	$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2}$	$\frac{\Delta y}{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i} Y}{f} \right)^2 \Delta x_i^2}$
Приведенные	$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i}}{X_i} \right)^2 \left( \frac{\Delta x_i}{X_i} \right)^2}$	$\frac{\Delta y}{Y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial x_i} Y}{\frac{f}{X_i}} \right)^2 \left( \frac{\Delta x_i}{X_i} \right)^2}$