

Белорусский национальный технический университет
Приборостроительный факультет
Кафедра «Конструирование и производство приборов»

Электронный учебно-методический комплекс
по учебной дисциплине

«ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ»

для студентов I степени получения высшего образования
специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические
приборы и аппараты»

Составитель: Богдан Павел Сергеевич

Минск БНТУ 2020

Перечень материалов

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) по учебной дисциплине «Элементы приборов» состоит из следующих разделов:

I. Теоретический раздел:

– курс лекций.

II. Практический раздел:

– лабораторный практикум.

III. Контроль знаний

- перечень вопросов, выносимых на зачет;
- перечень вопросов, выносимых на экзамен.

IV. Вспомогательный раздел:

– перечень учебников и учебных пособий, рекомендуемых к использованию в образовательном процессе.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цели создания ЭУМК:

Целью ЭУМК по дисциплине «Элементы приборов» является формирование у студентов комплекса знаний по изучаемой учебной дисциплине, соответствующих академическим, социально-личностным и профессиональным компетенциям специалиста в рамках образовательных стандартов для специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты».

Особенностями структурирования и подачи учебного материала являются изучение следующих теоретических материалов:

- измерительных преобразователей, измеряющих различные физические величины,
- методики проектирования и расчета электрических схем, предназначенных для работы с измерительными преобразователями.

Практическая часть содержит методические указания по выполнению лабораторных работ. Раздел контроля знаний содержит вопросы к зачету и экзамену. Вспомогательный раздел содержит перечень учебников и учебных пособий, рекомендуемых к использованию в образовательном процессе по дисциплине «Элементы приборов».

Рекомендации по организации работы с ЭУМК: Материалы данного электронного учебно-методического комплекса можно использовать при выполнении лабораторных работ, и конструкторских частей дипломных проектов (работ), связанных с проектированием датчиков.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	4
1. Общие сведения о датчиках и измерительных преобразователях	4
2. Характеристики датчиков.....	6
3. Структурные схемы датчиков	12
4. Схемы соединения звеньев.....	17
5. Измерительная информация. Методы её представления и передачи	21
6. Оптические элементы датчиков.....	26
7. Демпфирующие устройства	31
8. Схемы измерения электрических сопротивлений.....	39
9. Элементы для измерения перемещения	52
10. Элементы для определения конечного положения.....	91
11. Элементы для измерения линейной скорости	97
12. Элементы для измерения угловой скорости.....	99
13. Элементы для измерения ускорения	109
14. Элементы для измерения температуры.....	117
15. Элементы для измерения силы	146
16. Элементы для измерения давления	167
17. Расходомеры.....	171
18. Элементы для измерения Влажности	178
19. Элементы для измерения Уровня	179
20. Акустические датчики.....	183
21. Датчики света.....	185
22. Датчики измерения химических величин	189
II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	192
III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ	291
IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ.....	293

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДАТЧИКАХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Датчик представляет собой часть измерительной системы, имеющую самостоятельное конструктивное оформление, представляющая собой совокупность измерительных преобразователей, но вместе с тем обеспечивающую достижение полезного эффекта только при наличии всех других средств, входящих в систему.

Измерительный преобразователь (ИП) – средство измерения, предназначенное для преобразования измеряемой величины в другую величину или сигнал измерительной информации, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

По расположению в измерительной цепи различают первичные и промежуточные измерительные преобразователи.

Первичный измерительный преобразователь, называемый также датчиком, – это тот измерительный преобразователь, на который непосредственно действует измеряемая величина.

Остальные измерительные преобразователи называют промежуточными. Они расположены после первичного измерительного преобразователя и могут выполнять различные операции преобразования измерительного сигнала.

Структурную схему датчика с учетом расположения измерительных преобразователей можно представить следующим образом (рисунок 1.1)

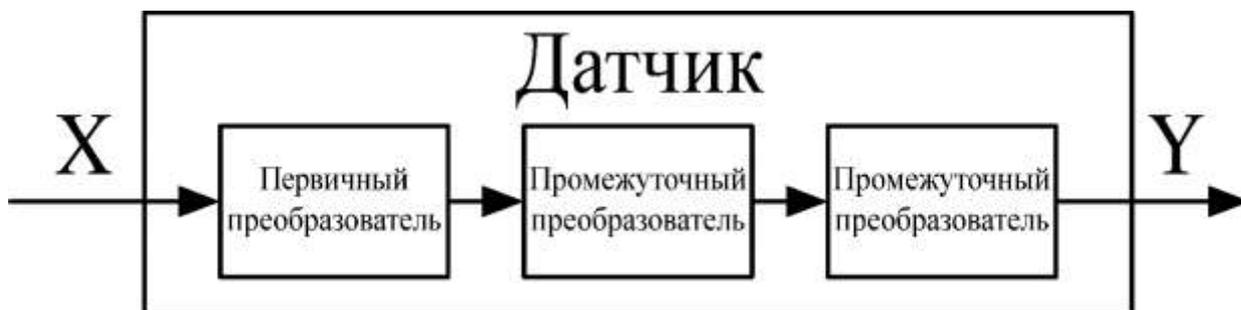


Рисунок 1.1 – Структурная схема датчика:

X – измеряемая величина;

Y – результат преобразования

К видам преобразований, осуществляемых измерительными преобразователями, относятся:

- изменение физического рода величины;
- масштабное (линейное или нелинейное) преобразование;
- масштабно-временное преобразование;
- аналого-цифровое преобразование;
- цифро-аналоговое преобразование;

– функциональное преобразование (любые математические операции над значениями величины).

По видам входных и выходных величин измерительные преобразователи (датчики) можно разделить на 4 больших класса:

- электрических величин в электрические, например, непрерывных во времени (аналоговых) в прерывистые (дискретные, цифровые);
- неэлектрических величин в неэлектрические, например, давление в перемещение жесткого центра мембраны;
- электрических величин в неэлектрические, например, тока в отклонение стрелки прибора;
- неэлектрических величин в электрические.

По необходимости в источнике питания все измерительные преобразователи можно разделить на две категории:

- пассивные;
- активные.

Пассивный измерительный преобразователь не нуждается в дополнительном источнике энергии и в ответ на изменение внешнего воздействия на его выходе всегда появляется электрический сигнал. Это означает, что такой ИП преобразует энергию внешнего сигнала в выходной сигнал.

Активный ИП для своей работы требует внешней энергии, называемой сигналом возбуждения. При формировании выходного сигнала активный датчик тем или иным способом воздействует на сигнал возбуждения, изменяя его параметры. Поскольку такие датчики меняют свои характеристики в ответ на изменение внешних сигналов, их иногда называются параметрическими.

По функциональному назначению измерительные преобразователи можно разделить на:

- индикаторные (метрологические характеристики не нормируются), ИП выдает информацию о наличии или отсутствии физической величины, либо;
- измерительные (метрологические характеристики нормируются);
- комбинированные.

По характеру преобразования значений физической величины измерительные преобразователи делят на две группы:

- непрерывного действия;
- дискретного (циклического) действия.

В электронной системе существуют три вида сигналов:

- аналоговый сигнал, являющийся электрическим представлением или аналогом (током или напряжением) исходного измеряемого параметра;

- цифровой сигнал, в котором функция, например, частота, используется для представления значения исходного параметра;
- кодированный цифровой сигнал, в котором параллельный цифровой сигнал, например, разрядностью в 8 бит, представляет значение исходного параметра.

Все преобразователи по своей сущности являются чисто аналоговыми устройствами, главным образом в силу того, что пока не известны физические явления, позволяющие преобразователю непосредственно представлять измеряемую величину в цифровом коде на выходе. Для возможности использования в цифровых измерительных системах аналоговый выходной сигнал первичного измерительного преобразователя должен иметь форму, пригодную для его преобразования в цифровую форму.

Механические величины, воспринимаемые первичными измерительными преобразователями можно разделить на три большие группы.

К первой группе относятся линейные и угловые размеры. Это геометрические параметры различных деталей в обрабатывающей промышленности, характеристики профилей и шероховатостей поверхностей, уровни сыпучих веществ и жидкостей в различных сосудах (баках, танкерах, паровых котлах и т. п.), перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали, параметры износа трущихся частей различных механизмов, биения валов, расстояния и т. д.

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

Ко второй группе относятся различного рода силовые воздействия. Это механические напряжения в деталях и конструкциях машин и сооружений, силы, крутящие моменты, давления жидкостей и газов, акустические шумы, разности давлений и т. п.

Диапазоны значений величин этой группы лежат в пределах от 10^{-8} до 10^8 (Па, Н), то есть составляет 16 порядков.

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

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ

2.1. Статические характеристики

Статическими называются характеристики и параметры, не зависящие от скорости изменения измеряемой величины и от скорости работы датчика.

Статические характеристики определяются при неизменной величине измеряемого параметра.

К ним относят.

Функция преобразования

Передаточная функция устанавливает взаимосвязь между выходным (как правило электрическим) сигналом датчика Y и внешним воздействием x : $Y=f(x)$. Эта функция может быть как линейной, так и нелинейной (например, логарифмической, экспоненциальной или степенной). Во многих случаях передаточная функция является одномерной (то связывает выходной сигнал только с одним внешним воздействием).

Диапазон измеряемых значений

Динамический диапазон внешних воздействий, который датчик может воспринять, называется диапазоном измеряемых значений. Эта величина показывает максимально возможное значение входного сигнала, которое датчик может преобразовать в электрический сигнал, не выходя за пределы допустимых погрешностей.

Диапазон выходных значений

Диапазон выходных значений – алгебраическая разность между электрическими выходными сигналами, измеренными при максимальном и минимальном внешнем воздействии. В эту величину должны входить все возможные отклонения от идеальной передаточной функции.

Точность

Под точностью датчика чаще всего подразумевают его неточность или погрешность измерений. Под погрешностью измерений, как правило, понимают величину максимального расхождения между показаниями реального и идеального датчиков.

Погрешность датчиков может быть представлена в следующих видах:

1. Непосредственно в единицах измеряемой величины.
2. В процентах от значения максимального входного сигнала.
3. В единицах выходного сигнала.

На точность датчиков влияют такие характеристики как: гистерезис, мертвая зона, параметры калибровки, повторяемость датчиков от партии к партии и воспроизводимость погрешностей. Предельно допустимые погрешности обычно соответствуют самым худшим рабочим характеристикам датчиков.

Гистерезис

Гистерезис – это разность значений выходного сигнала для одного и того же входного сигнала, полученных при его возрастании и убывании.

Нелинейность

Нелинейность определяется для датчиков, передаточную функцию которых возможно аппроксимировать прямой линией. Под нелинейностью понимается максимальное отклонение реальной передаточной функции от аппроксимирующей прямой линии.

Насыщение

Каждый датчик имеет свои пределы рабочих характеристик. Даже если он считается линейным, при определенном уровне внешнего воздействия его выходной сигнал перестанет отвечать приведенной линейной зависимости.

Воспроизводимость

Воспроизводимость - это способность датчика при соблюдении одинаковых условий выдавать идентичные результаты. Воспроизводимость результатов определяется по максимальной разности выходных значений датчика, полученных в двух циклах калибровки. Обычно она выражается в процентах от максимального значения входного сигнала:

Мертвая зона

Мертвая зона - это нечувствительность датчика в определенном диапазоне входных сигналов. В пределах этой зоны выходной сигнал остается почти постоянным (часто равным нулю).

Разрешающая способность

Разрешающая способность характеризует минимальное изменение измеряемой величины, которое может почувствовать датчик. При непрерывном изменении внешнего воздействия в пределах диапазона измеряемых значений выходные сигналы датчиков не будут всегда абсолютно гладкими, даже при отсутствии шумов. На них всегда будут видны небольшие ступеньки.

Сигнал возбуждения

Сигнал возбуждения - это электрический сигнал, необходимый активному датчику для работы. Сигнал возбуждения описывается интервалом напряжений и/или тока. Для некоторых типов датчиков также необходимо указывать частоту сигнала возбуждения и его стабильность.

2.2. Динамические характеристики датчиков

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т.д. Однако на практике выходной сигнал датчика не всегда достаточно точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних воздействий, не позволяющем сигналам распространяться с

бесконечно большой скоростью. Другими словами можно сказать, что любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми динамическими характеристиками. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с динамической погрешностью. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести, в лучшем случае, к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а, в худшем случае, - к возникновению колебаний.

В зависимости от конструкций датчиков, уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

Датчики нулевого порядка (рисунок 2.1а), имеют линейную передаточную функцию. Они относятся к устройствам мгновенного действия. Иными словами, у таких датчиков нет необходимости определять динамические характеристики.

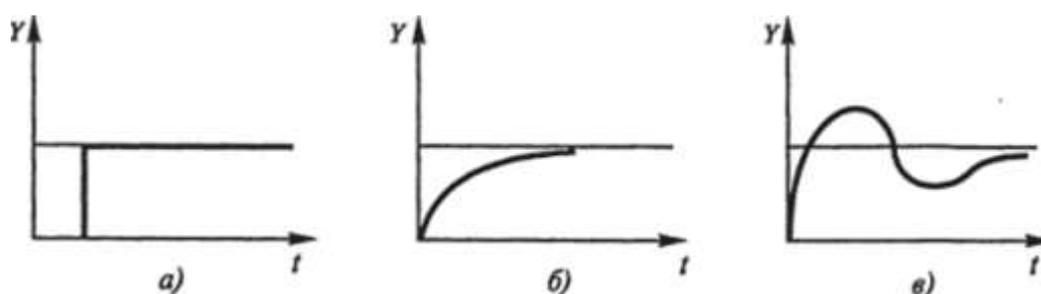


Рисунок 2.1 – Поведение выходного сигнала датчиков при ступенчатом внешнем воздействии

Датчики первого порядка (рисунок 2.1б) имеют в составе энергонакопительный элемент.

Выходной сигнал такого датчика после резкого (ступенчатого) изменения входной величины с задержкой, «плавно» достигает требуемого значения.

Датчики второго порядка (рисунок 2.1в) имеют два энергонакопительных элемента.

На выходах датчиков второго порядка после подачи на их входы ступенчатого воздействия практически всегда появляются колебания. Эти колебания могут быть очень кратковременными, тогда говорят, что датчик демпфирован, или они могут длиться продолжительное время, а то и постоянно. Продолжительные колебания на выходе датчика являются свидетельством его неправильной работы, поэтому их надо стараться избегать. Любой датчик второго порядка характеризуется резонансной (собственной) частотой, которая выражается в герцах или радианах в секунду. На

собственной частоте происходит значительное увеличение выходного сигнала датчика. От резонансной частоты зависят механические, тепловые и электрические свойства детекторов. Обычно рабочий частотный диапазон датчиков выбирается либо значительно ниже собственной частоты (по крайней мере на 60%), либо выше ее. Однако для некоторых типов датчиков резонансная частота является рабочей.

К динамическим характеристикам датчиков относят:

- время разогрева (это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений). Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), для своего разогрева требуют секунды, а то и минуты;

- время прохождения зоны нечувствительности – время между началом изменения физической величины и моментом реакции датчика, т. е. моментом начала изменения выходного сигнала;

- запаздывание – время, через которое показания датчика первый раз достигают 50 % установившегося значения.

- быстродействие (выражается в единицах внешнего воздействия на единицу времени);

- мера инерционности (требуемое для достижения выходным сигналом датчика уровня 90% от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия);

- постоянная времени (время, за которое выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего приблизительно 63% от установившегося значения, по истечении времени, равного двум постоянным времени, уровень выходного сигнала составит 86.5%, а после трех постоянных времени - 95%);

- частота среза (характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений). Верхняя частота среза показывает насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза – с каким самым медленным сигналом он может работать.

- фазовый сдвиг на определенной частоте (показывает насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия). Сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами.

2.3. Факторы окружающей среды

Условия хранения - совокупность предельных значений факторов окружающей среды, воздействующих на датчик в течение определенного промежутка времени, при которых не происходит существенного изменения его рабочих характеристик и обеспечивается поддержание его работоспособности. Обычно условия хранения устанавливают: максимальную и минимальную температуры хранения, а также максимальную

относительную влажность при этих температурах. К значению относительной влажности необходимо добавить такую характеристику, как «отсутствие конденсата». В зависимости от физической природы датчика могут указываться дополнительные условия хранения, например, максимальное давление, присутствие некоторых газов или отсутствие вредных испарений.

Краткосрочная и долгосрочная стабильность (дрейф) – характеристики точности датчиков. Краткосрочная стабильность описывает изменения рабочих характеристик датчика в течении минут, часов и даже дней. Выходной сигнал датчика может увеличиваться или уменьшаться, что может быть выражено через величину шума сверхнизкой частоты. Долгосрочная стабильность зависит от процессов старения, которые изменяют электрические, механические, химические и термические свойства материалов датчика. Долгосрочный дрейф параметров может измеряться достаточно длительными интервалами времени: месяцами и годами. Долгосрочная стабильность является очень важной характеристикой для датчиков, используемых для прецизионных измерений. Скорость старения определяется условиями хранения и эксплуатации, а также тем, насколько хорошо элементы датчиков изолированы от окружающей среды, и какие материалы использовались для их изготовления. Интенсивное старение типично для датчиков, в состав которых входят органические компоненты, и не столь существенно для датчиков из неорганических элементов.

Для повышения долговременной стабильности элементы датчиков подвергают термоциклической подготовке, моделирующей экстремальные условия работы. Такая термоциклическая подготовка повышает стабильность характеристик датчиков, позволяет обнаружить скрытые дефекты и произвести отбраковку негодных устройств.

В перечень условия окружающей среды, воздействующих на датчики, практически никогда не входят физические параметры, измеряемые датчиками. Например, для датчика, определяющего давление воздуха, учитываются следующие факторы окружающей среды: температура воздуха и рядом расположенных объектов, влажность, вибрации, ионизирующая радиация, электромагнитные поля, гравитационные силы и т.п. Все эти параметры не только могут, но и влияют на рабочие характеристики датчика. При этом необходимо учитывать, как динамические, так и статические составляющие этих факторов. Многие из параметров окружающей среды имеют мультипликативную природу, т.е. они влияют на передаточную функцию датчика, например, меняют его коэффициент усиления.

Температура окружающей среды влияет на рабочие характеристики датчиков, поэтому всегда должна приниматься во внимание. Рабочий диапазон температур – это интервал окружающих температур, задаваемых верхним и нижним предельными значениями (например, $-20...+100^{\circ}\text{C}$), внутри которого датчик работает заданной точностью. Передаточные функции многих датчиков сильно зависят от окружающей температуры. Для снижения температурных погрешностей в состав самих датчиков или в схемы

преобразователей сигналов часто встраиваются специальные компенсационные элементы. Самый простой способ определения допусков по температуре заключается в установлении интервалов внутри рабочего диапазона температур, для каждого из которых указывается индивидуальная погрешность. Например, в паспортных данных может быть указано, что в интервале температур $0...50^{\circ}\text{C}$ точность датчика составляет 1%, в интервалах $-20...0^{\circ}\text{C}$ и $+50...100^{\circ}\text{C}$ - 2%, в остальных интервалах в пределах диапазона измеряемых температур ($-40...+150^{\circ}\text{C}$) - 3%. Температура окружающей среды также влияет на динамические характеристики, особенно в случаях, когда применяется вязкостное демпфирование.

Погрешность саморазогрева появляется в датчиках, нагреваемых от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, через термисторный датчик температуры необходимо пропускать электрический ток, что приводит к рассеянию тепла внутри его конструкции. При этом степень саморазогрева датчика зависит от его конструктивных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т.д. Саморазогрев датчика приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии. Самый сильный разогрев датчиков наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность саморазогрева.

3. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ДАТЧИКОВ

В терминах «черного ящика» измерительный преобразователь является довольно простым устройством. Он имеет чувствительный элемент, воспринимающий непосредственно измеряемую величину, преобразующий элемент, генерирующий некоторый электрический выходной сигнал в зависимости от значения измеряемой величины, и, возможно, некоторые схемы возбуждения (и/или формирования сигнала).

Кроме того, измерительные приборы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различных неблагоприятных условий (внешних неинформативных параметров), ухудшающих их точность.

Таким образом, в самом общем виде структурная схема измерительного прибора или датчика выглядит, как показано на рисунке 3.1.

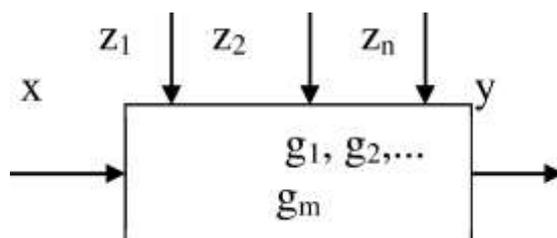


Рисунок 3.1 – Общее представление структурной схемы датчика в общем виде

На выходной сигнал y могут оказывать воздействие: z_1, z_2, \dots, z_n – внешние неинформативные параметры (влажность, температура, давление, вибрация и т.д.); g_1, g_2, \dots, g_m – внутренние дестабилизирующие факторы (тип материала, трение, люфты, нагрев, контактная ЭДС и т.д.)

Для детального анализа источника погрешностей расчленяют на отдельные, относительно простые элементы – звенья и составляют так называемую структурную схему связи элементов между собой. Рассматривая каждое звено как самостоятельный преобразователь и имея его в любом виде выраженную характеристику, можно довольно легко получить характеристику всего прибора. Приборы, построенные по простым схемам обычно дешевле и надежнее приборов, построенных по сложным схемам. Однако усложнение схемы приводит к прибору с лучшими метрологическими характеристиками.

Измерение рассматривается как процесс приема и преобразования информации об измеряемой величине, происходящий в измерительных устройствах. Структура измерительных устройств в связи с этим представляется в виде совокупности измерительных преобразователей, осуществляющих функциональные измерительные преобразования сигналов различной физической природы. Существует множество разновидностей измерительных устройств, но все эти устройства выполнены на основе ограниченного числа измерительных преобразователей.

Несмотря на многообразие измерительных устройств и датчиков, а также структурных схем, на основе которых они построены, можно выделить в них некоторые типовые узлы, присутствие которых обусловлено общим подходом к преобразованию измерительной информации (рисунок 3.2).

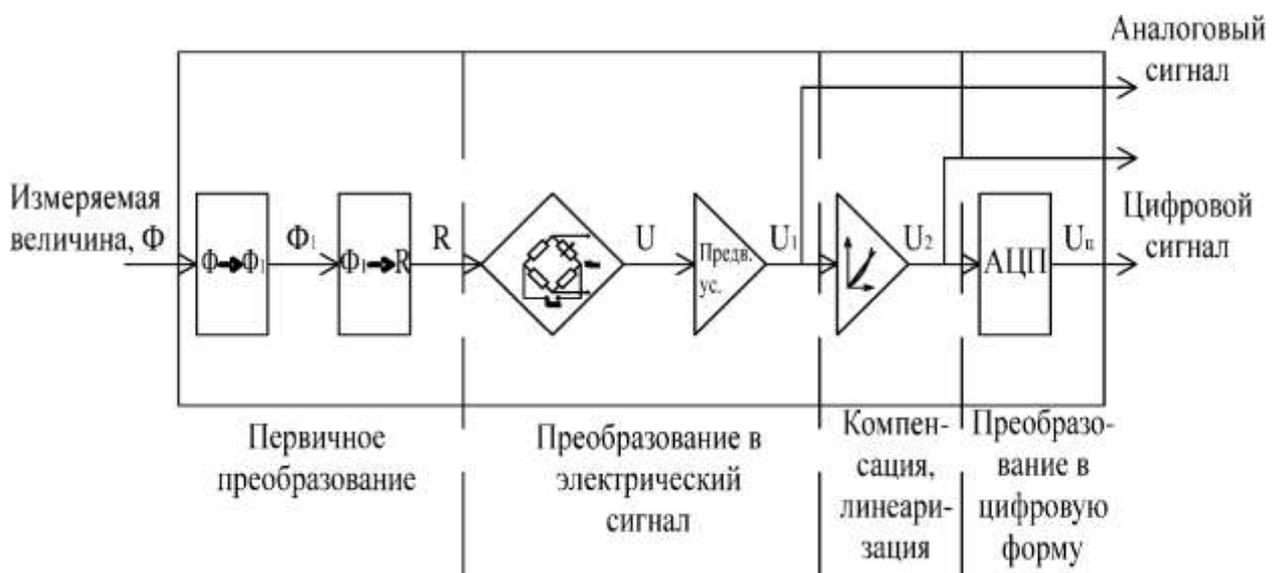


Рисунок 3.2 – Типовая структурная схема датчика

Как правило, измеряемая величина вначале преобразуется в вид, удобный для перевода в электрическую форму, далее происходит преобразование в напряжение (предпочтительнее) или ток. Полученный

электрический сигнал проходит линеаризацию, здесь же может осуществляться компенсация внешних воздействий. После этого сигнал из аналоговой формы преобразуется в цифровую, как наиболее удобную для дальнейшей обработки и хранения.

Для примера можно привести тензорезисторный датчик. В настоящее время разработано много различных типов тензорезисторных датчиков. Это датчики для измерения усилий, деформаций, моментов и других физических величин. Датчики имеют различные пределы измерения, отличаются конструктивным исполнением, предназначены для различных условий эксплуатации и т. д. Но, представляя тензорезисторные датчики в виде последовательной цепи измерительных преобразователей, можно заметить, что некоторые из этих преобразователей являются общими для всех датчиков. Каждый тензорезисторный датчик включает в себя такие измерительные преобразователи, как тензорезистор и измерительная цепь, независимо от того, является ли он датчиком усилия или перемещения. Очень многие тензорезисторные датчики включают в себя упругие элементы, преобразующие усилие или давление в деформацию и работают по принципу, показанному на рисунке 3.3.

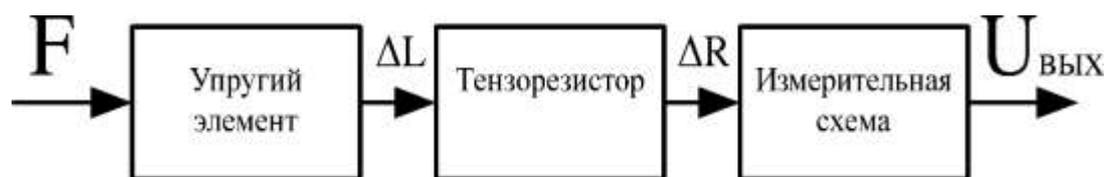


Рисунок 3.3 – Структурная схема тензорезисторного датчика усилий

Измеряемое усилие F с помощью упругого элемента преобразуется в деформацию ΔL . Деформация упругого элемента воспринимается тензорезистором и преобразуется в изменение сопротивления тензорезистора ΔR , которое в измерительной схеме преобразуется в величину выходного напряжения. Эта структурная схема является общей для других тензорезисторных датчиков, у которых измеряемая величина с помощью тех или иных измерительных преобразователей преобразуется в силу. Такими преобразователями могут быть, например, мембрана для датчика давления или инерционная масса для датчика ускорений.

Таким образом, структурная схема охватывает практически все многообразие тензорезисторных датчиков, отличающихся между собой не только условиями эксплуатации и пределами измерения, но и входной величиной.

Аналогичную картину можно увидеть, если, например, тензорезисторный преобразователь заменить индуктивным (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Структурная схема индуктивного датчика усилий

Замена только одного измерительного преобразователя другим позволяет получить цепь преобразования физических величин другой обширной группы датчиков – индуктивных. Рассуждая аналогичным образом, можно составить структурную схему любого другого датчика, в котором измеряемая величина претерпевает ряд последовательных преобразований. Такие схемы являются схемами последовательного преобразования измеряемой величины. Цепь последовательного преобразования измеряемой величины характеризуется тем, что измеряемая величина поступает на вход первого измерительного преобразователя, часто называемого входным измерительным преобразователем; выходная величина его является входной величиной второго измерительного преобразователя и т. д.

Преобразование осуществляется до тех пор, пока на выходе последнего измерительного преобразователя, который можно назвать выходным измерительным преобразователем, не будет получена выходная величина, удобная для восприятия человеком или для использования в цепи дальнейшего преобразования с целью регистрации или управления.

Рассматривая физические процессы во всех известных измерительных преобразователях, можно в каждом случае установить связь между выходной и входной величинами в виде функциональной зависимости:

$$Y = f(X)$$

Математическое (или графическое) описание этой связи носит название функции преобразования преобразователя. Аналогичная характеристика для датчика в целом называется функцией преобразования датчика.

Отношение изменения выходной величины ΔY к соответствующему изменению входной величины ΔX называется чувствительностью датчика:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

Если функция преобразования является линейной, то чувствительность является постоянной величиной на всем рабочем диапазоне преобразователя и для любых интервалов.

Если функция преобразования является нелинейной, тогда значение чувствительности изменяется в зависимости от выбранного участка на рабочем диапазоне. Таким образом чувствительность будет являться

функцией входной величины ($S = F(X)$), и определяться для отдельного интервала как

$$S_i = \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i}$$

В пределе функция чувствительности определяется как первая производная Y по X .

Отношение значения выходной величины датчика Y , к соответствующему значению входной величины X , определяет коэффициент преобразования

$$K = \frac{Y_i}{X_i}$$

Если зависимость между выходной и входной величинами является линейной, то чувствительность и коэффициент преобразования равны.

Для датчиков, работающих с электрическими величинами (т.е. для их подавляющего большинства) важное значение имеет согласование выходных и входных электрических сопротивлений между различными участками электрической схемы. Типовую схему согласования можно рассмотреть на примере тензорезистивного датчика усилий (рисунок 7).

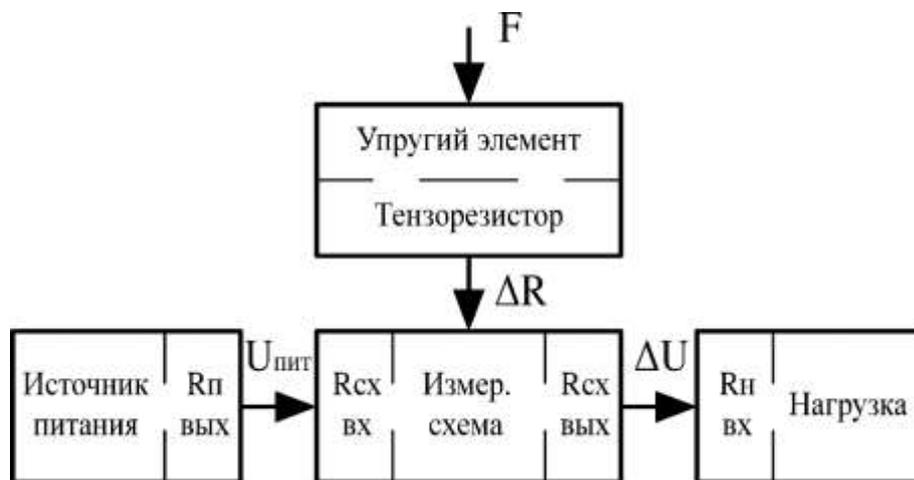


Рисунок 3.5 – Структурная схема прохождения электрического сигнала для тензорезистивного датчика усилий

Измерительная схема получает напряжение питания $U_{\text{пит}}$ от источника питания. На основе этого напряжения схема осуществляет преобразование принимаемого от тензорезисторного преобразователя сигнала в виде изменяющегося сопротивления ΔR в изменяющееся напряжение ΔU .

Источник питания обладает внутренним выходным сопротивлением (сопротивлением между выходными клеммами) $R_{\text{п вых}}$, измерительная схема обладает по отношению к питанию входным сопротивлением $R_{\text{сх вх}}$.

Под нагрузкой, подключенной к измерительной схеме, понимается любое устройство, преобразователь или схема, на которую передается

полученное напряжением ΔU . Это может быть индикатор напряжения (любого вида), аналого-цифровой преобразователь, схема обработки сигнала (линеаризации, хранения, передачи и т.п.).

По отношению к этой связи измерительная схема имеет внутреннее выходное сопротивление $R_{\text{сх вых}}$, нагрузка – внутреннее входное сопротивление $R_{\text{н вх}}$.

Для нормальной передачи напряжения питания и сигнала каждое входное сопротивление должно быть намного больше выходного, т.е. для данной схемы должно выполняться:

$$\begin{aligned} R_{\text{сх вх}} &\gg R_{\text{п вых}} \\ R_{\text{н вх}} &\gg R_{\text{сх вых}} \end{aligned}$$

4. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ЗВЕНЬЕВ

4.1. Последовательное соединение:

Последовательной схемой соединения преобразователей называется такая, при которой входной величиной каждого последующего преобразователя служит выходная величина предыдущего (рисунок 4.1).

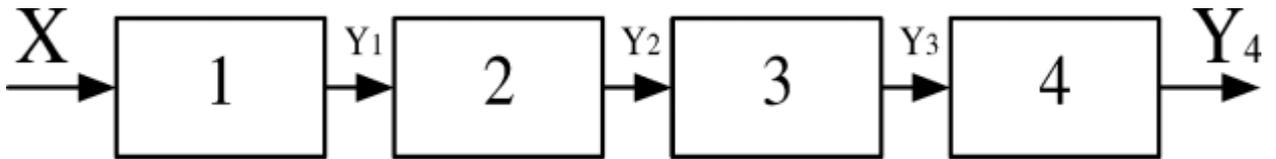


Рисунок 4.2 – Структурная схема последовательного соединения звеньев

Чувствительность такой цепи определяется как

$$S = \frac{\Delta Y_4}{\Delta X}$$

Чувствительность каждого звена можно выразить:

$$S_1 = \frac{\Delta Y_1}{\Delta X}, S_2 = \frac{\Delta Y_2}{\Delta Y_1}, S_3 = \frac{\Delta Y_3}{\Delta Y_2}, S_4 = \frac{\Delta Y_4}{\Delta Y_3}$$

Перемножив значения чувствительностей, получим:

$$S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 = \frac{\Delta Y_4}{\Delta X} = S$$

Таким образом, при последовательном соединении преобразователей общая чувствительность полученной цепи равна произведению чувствительностей каждого звена (преобразователя).

Проверим, как погрешности каждого отдельного преобразователя будут влиять на выходной сигнал. Для этого укажем их на схеме (рисунок 4.3).

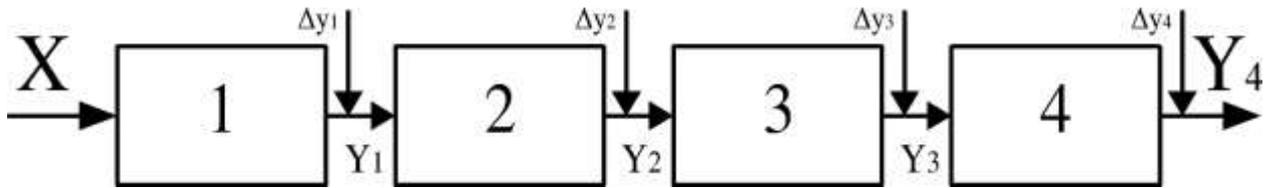


Рисунок 4.3 – Структурная схема последовательного соединения звеньев с учетом погрешности каждого звена

Таким образом, выходной сигнал первого звена будет равен $Y_{1н} + \Delta y_1$, где $Y_{1н}$ – идеальный выходной сигнал, Δy_1 – погрешность, вносимая данным звеном. Зная чувствительность звена, можно записать значение его выходного сигнала:

$$Y_1 = X \times S_1 + \Delta y_1$$

Для второго звена:

$$Y_2 = Y_1 \times S_2 + \Delta y_2 = X \times S_1 \times S_2 + \Delta y_1 \times S_2 + \Delta y_2$$

Для третьего звена:

$$Y_3 = Y_2 \times S_3 + \Delta y_3 = X \times S_1 \times S_2 \times S_3 + \Delta y_1 \times S_2 \times S_3 + \Delta y_2 \times S_3 + \Delta y_3$$

И для четвертого звена:

$$Y_4 = Y_3 \times S_4 + \Delta y_4 = X \times S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 + \Delta y_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4 + \Delta y_2 \times S_3 \times S_4 + \Delta y_3 \times S_4 + \Delta y_4.$$

Следовательно, при последовательном соединении преобразователей погрешность прибора равна сумме пересчитанных к выходу погрешностей всех входящих в него преобразователей.

Практически при построении датчиков применяется разновидность последовательной структурной схемы – схема с участком параллельно соединенных измерительных преобразователей (рисунок 4.4).

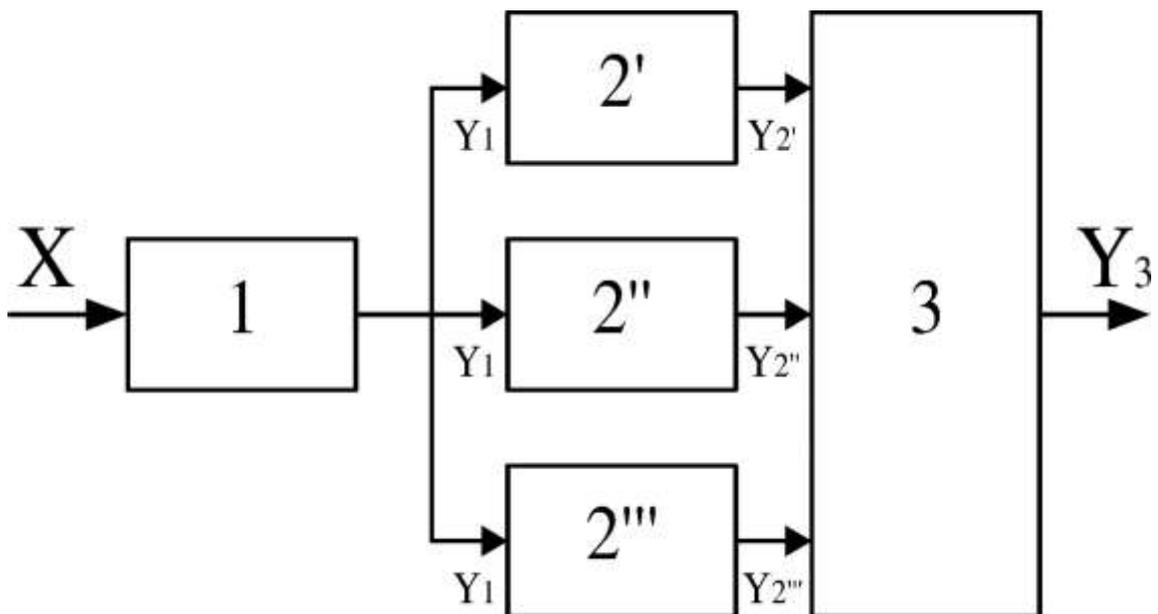


Рисунок 4.4 – Последовательная структурная схема с параллельным участком

Например, подавляющее большинство тензорезисторных датчиков выполняют так, чтобы использовать два либо четыре рабочих тензорезистора. Это позволяет увеличить выходной сигнал датчика. В таком случае четыре одинаковых измерительных преобразователя – тензорезистора – имеют одну и ту же входную величину – деформацию упругого элемента. Тензорезисторы, включенные в мостовую измерительную цепь, имеют выходные сигналы, характеризующиеся относительным изменением сопротивления. Эти сигналы суммируются измерительной цепью и преобразуются в величину выходного напряжения. Такое преобразование применяют и в других типах датчиков.

Функция преобразования датчика, выполненного в соответствии с этой схемой, имеет вид:

$$Y = X \times S_1 \times (S_2' + S_2'' + S_2''') \times S_3$$

Таким образом, чувствительность прямого параллельного преобразования равна сумме чувствительностей преобразователей, включенных параллельно.

4.2. Дифференциальная схема соединения преобразователей

Дифференциальной называется схема, содержащая два канала (с одним или несколькими преобразователями), имеющих одинаковую функцию преобразования, выходные величины каждого из каналов подаются на два входа вычитающего преобразователя. Вычитающий преобразователь – это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого определяется разностью сигналов на входах (рисунок 4.5).

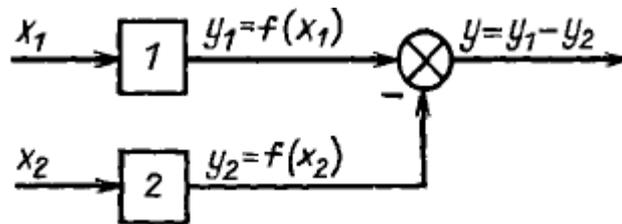


Рисунок 4.5 – Структурная схема дифференциального соединения преобразователей

Функция преобразования дифференциальной схемы будет выглядеть:

$$Y = Y_1 - Y_2 = S \times X_1 - S \times X_2$$

Дифференциальные схемы бывают двух типов.

В схеме первого типа измеряемая величина воздействует на вход одного канала, а на вход другого канала подается величина той же природы, не зависящая от измеряемого параметра, но подверженная воздействию внешних факторов аналогично первому каналу. Тогда функцию преобразования схему первого типа можно представить:

$$Y = Y_1 - Y_2 = S \times X_1 - S \times X_0 = S \times (X_1 - X_0)$$

где X_0 – некоторая постоянная величина (для некоторых видов схем она может быть равна нулю).

При появлении погрешности Δx от изменения внешних условий (например, температуры) значение сигнала обоих каналов изменится на эту величину:

$$\begin{aligned} Y_1 &= S \times (X_1 + \Delta x) \\ Y_2 &= S \times (X_0 + \Delta x) \end{aligned}$$

Тогда выходной сигнал будет равен:

$$\begin{aligned} Y &= Y_1 - Y_2 = S \times (X_1 + \Delta x) - S \times (X_0 + \Delta x) = S \times (X_1 + \Delta x - X_0 - \Delta x) \\ Y &= S \times (X_1 - X_0) \end{aligned}$$

То есть значение на выходе схемы не изменится, произойдет компенсация погрешности. При этом чувствительность схемы будет равна чувствительности первого канала.

В схеме второго типа измеряемая величина после некоторого преобразования воздействует на оба канала, причем таким образом, что когда на входе одного канала входная величина возрастает, на входе другого – уменьшается:

$$\begin{aligned} Y_1 &= S \times X_1 \\ Y_2 &= S \times (-X_1) \end{aligned}$$

Выходной сигнал в таком случае будет равен:

$$Y = Y_1 - Y_2 = S \times (X_1) - S \times (-X_1) = S \times (X_1 + X_1) = 2 \times S \times X_1$$

Следовательно, применяя дифференциальную схему второго типа можно в два раза увеличить чувствительность по сравнению с чувствительностью одного канала.

4.3. Логометрическая схема соединения преобразователей

Содержит два канала с последовательным соединением преобразователей, выходные величины которых подаются на логометрический преобразователь (рисунок 4.6).

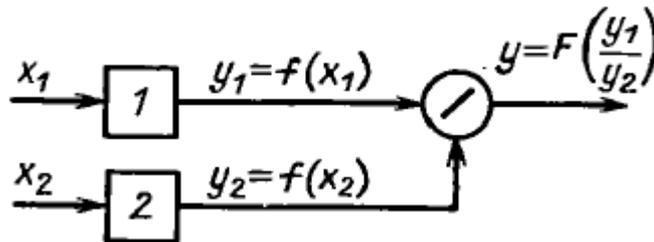


Рисунок 4.6 – Структурная схема логометрического соединения преобразователей

Логометрический преобразователь, это преобразователь с двумя входами, выходная величина которого является функцией частного от деления входных величин.

Оба канала идентичны и находятся в равных условиях. Схема этого вида позволяет компенсировать мультипликативную погрешность (погрешность, связанную с изменением чувствительности каналов) по принципу, аналогичному дифференциальной схеме.

4.4. Компенсационная схема включения преобразователей

Компенсационная схема (схема с обратной связью) (рисунок 4.7) позволяет компенсировать как аддитивную, так и мультипликативную погрешности, а также повысить точность измерения.

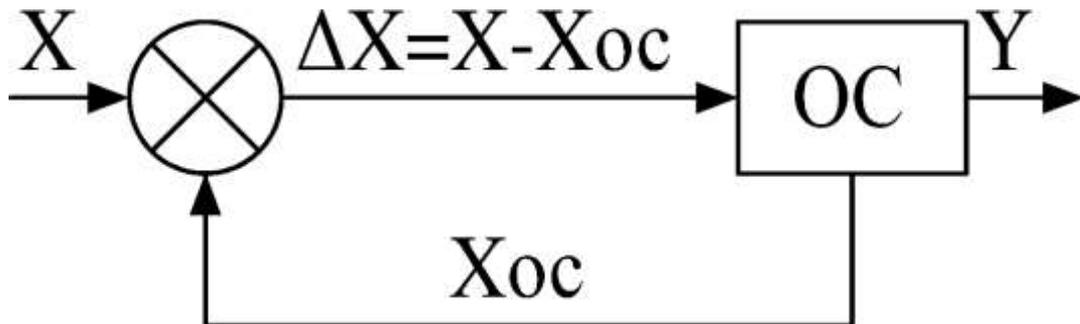


Рисунок 4.7 – Структурная схема компенсационного соединения преобразователей

На один из входов вычитающего преобразователя подается измеряемая величина X . На другой вход подается сигнал X_{oc} (ОС – обратной связи), той же физической природы, что и входная величина. Разность $\Delta X = X - X_{oc}$ поступает на звено обратной связи. Это звено по полученному значению ΔX формирует такой сигнал X_{oc} , чтобы свести ΔX к нулю.

Выходной величиной этой схемы является значение X_{oc} (непосредственно или после дальнейшего преобразования).

Достоинством такой схемы является работа преобразующего звена (звена ОС) с крайне малыми входными значениями, что позволяет использовать высокоточные средства измерения при работе со входной величиной X любого значения.

5. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ. МЕТОДЫ ЕЁ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ

Информацию о значении измеряемых физических величин называют измерительной информацией.

Материальным носителем информации является некоторая физическая величина (сигнал), значение которой связано с измеряемой величиной функциональной зависимостью.

Носителями информации могут служить как неэлектрические величины (угол поворота стрелки индикатора часового типа, давление в баллоне манометрического термометра и др.), так и электрические.

В электрическом виде измерительная информация может быть представлена значением тока либо напряжения (такие параметры, как

электрическое сопротивление, емкость и пр. здесь не учитываются, поскольку для измерения они сами требуют преобразования в значение тока либо напряжения). Напряжение является более предпочтительным в использовании, поскольку требует значительно меньших затрат энергии и непосредственно воспринимается аналого-цифровыми преобразователями.

Носителями могут служить:

- постоянное напряжение;
- переменное синусоидальное напряжение;
- импульсное напряжение.

При передаче информации постоянным напряжением происходит изменение его значения в соответствии с изменением измеряемого параметра. Данный способ является самым простым как для генерации, так и для приема и обработки, но применим не для всех видов измерительных преобразователей, а сам сигнал при такой передаче подвержен помехам и наводкам.

Передача информации переменным синусоидальным или импульсным напряжением осуществляется при помощи модуляции.

Модуляция – это процесс изменения одного или нескольких параметров высокочастотного сигнала в соответствии с формой передаваемого низкочастотного сигнала.

Исходный высокочастотный сигнал называется несущим сигналом или несущей частотой. Передаваемый низкочастотный – модулирующим сигналом. Полученный сигнал – модулированным.

5.1. Модуляция синусоидального сигнала

Синусоидальный сигнал описывается выражением

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \text{ где}$$

U_0 – амплитуда;

ω_0 – частота;

φ_0 – начальная фаза.

Индекс «0» означает, что данная величина не изменяется в процессе генерации сигнала.

Таким образом, у синусоидального сигнала имеется три параметра, по которым можно его модулировать.

5.1.1. Амплитудная модуляция

При амплитудной модуляции происходит изменение амплитуды несущего сигнала в зависимости от передаваемого значения. Процесс формирования модулированного сигнала показан на рисунке 5.1.

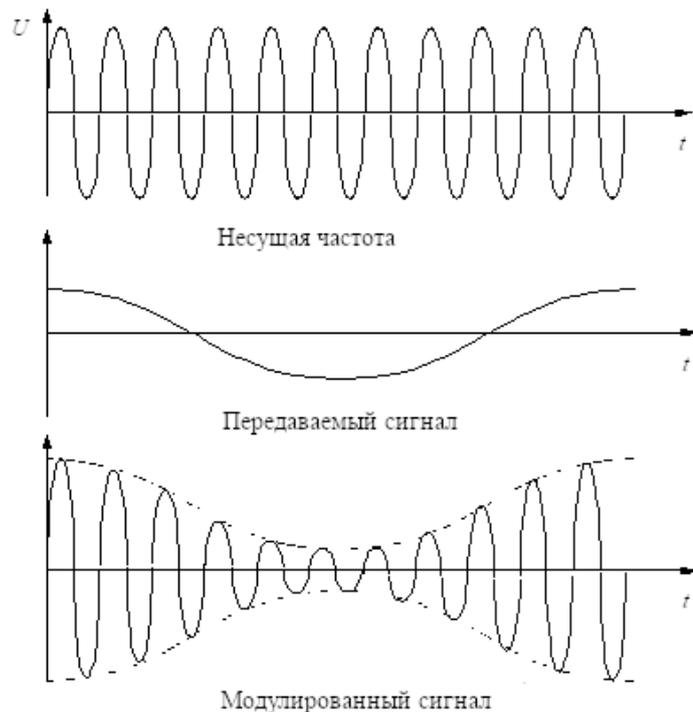


Рисунок 5.1 – Получение сигнала амплитудной модуляции

Амплитудная модуляция используется в следующих случаях:

- при возбуждении измерительного преобразователя синусоидальным напряжением выходной сигнал измерительной схемы, как правило, будет являться амплитудно-модулированным;
- когда канал связи используется для передачи нескольких сообщений от различных источников;
- когда канал физически не может переносить сигналы низких частот спектра, но переносит сигналы более высокой частоты.

Достоинства:

- измерительный сигнал переносится в требуемую область частот с довольно узким спектром;
- простота модуляции и демодуляции;
- простота усиления модулированного сигнала.

Недостатки:

- подверженность помехам и появлению внешних наводок;
- уменьшение амплитуды сигнала при большом сопротивлении канала связи, это приводит к погрешности необходимости калибровки.

5.1.2. Частотная модуляция

При частотной модуляции происходит изменение частоты несущего сигнала в зависимости от передаваемого значения (рисунок 5.2).

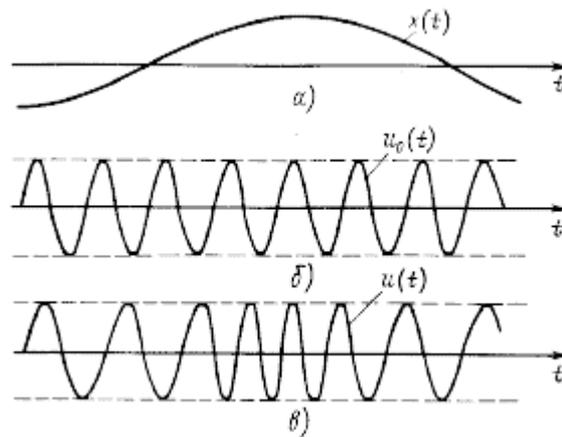


Рисунок 5.2 – Получение сигнала частотной модуляции

Частотная модуляция применяется в следующих случаях:

- при использовании измерительного преобразователя в качестве частотозадающего элемента измерительной цепи;
- для повышения устойчивости передаваемого сигнала к помехам.

Достоинство:

+ высокая помехозащищенность.

Недостатки:

- сложность реализации модуляторов и демодуляторов;
- сравнительно большой диапазон используемых частот при передаче, что затрудняет его фильтрацию и обработку.

5.1.3. Фазовая модуляция

При фазовой модуляции происходит изменение фазы несущего сигнала в зависимости от передаваемого значения.

Фазовая модуляция синусоидального сигнала используется крайне редко. По свойствам она аналогична частотной, но требует дополнительного канала связи для передачи сигнала начала отсчета.

5.2. Модуляция импульсного сигнала

Импульсный сигнал (рисунок 5.3) представляет собой периодическую последовательность импульсов прямоугольной формы, которые характеризуются следующими параметрами: U_0 – амплитудой, T_0 – периодом, φ_0 – начальной фазой, t_0 – длительностью импульса.

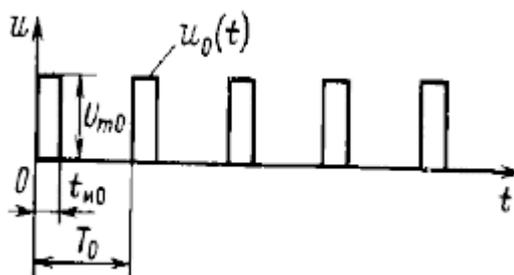


Рисунок 5.3 – Параметры импульсного сигнала

Таким образом, по сравнению с синусоидальным сигналом импульсный имеет на один параметр больше.

5.2.1. Амплитудно-импульсная модуляция

Состоит в изменении амплитуды импульса в зависимости от значения измерительного сигнала (рисунок 5.4). Значения берутся в моменты начала импульса, т.е. имеет место дискретизация функции по времени.

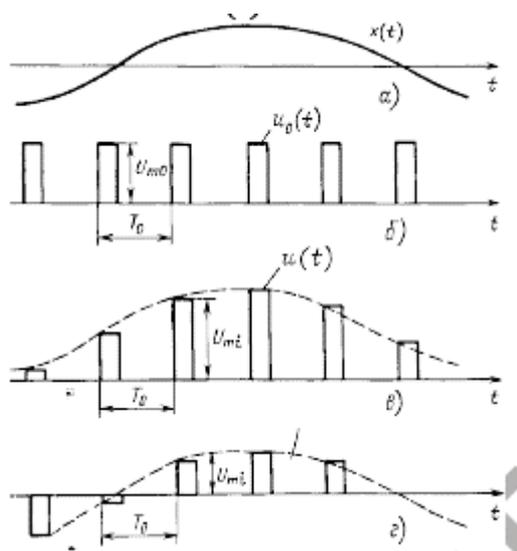


Рисунок 5.4 – Получение сигнала амплитудно-импульсной модуляции

По свойствам, достоинствам и недостаткам данный вид модуляции аналогичен амплитудной модуляции синусоидального сигнала.

5.2.2. Частотно-импульсная модуляция

Она заключается в изменении частоты следования импульсов в зависимости от значения передаваемой измерительной информации.

Достоинством данного вида модуляции является то, что модулированный сигнал представляет собой последовательность импульсов с равной амплитудой, что делает возможным его воспроизведение и прием средствами цифровой электроники.

5.2.3. Широтно-импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция получается путем изменения длительности импульсов по зависимости от передаваемого значения, при этом период и амплитуда сохраняются постоянными.

Широтно-импульсная модуляция редко применяется для передачи измерительной информации.

5.2.4. Кодово-импульсная модуляция

Она основана на преобразовании передаваемого значения в цифровой код, состоящий из последовательности импульсов. Передаваемое значение определяется по сочетанию импульсов напряжения и промежутков между ними. Такой метод используется в процессорных системах, управляемых программно. Существует множество разновидностей данного метода, отличающихся способом преобразования передаваемого значения в цифровой код.

Помимо приведенных выше методов модуляции одного параметра сигнала, применяется одновременная модуляция нескольких, например, фазо-частотная, амплитудно-частотная и др. Их применение обуславливается принципами работы конкретных измерительных преобразователей или электронных схем.

6. ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДАТЧИКОВ

6.1. Виды и параметры светового излучения

Свет – это электромагнитные колебания с длинами волн от 1 нм до 1 мм или частотами от 10^{17} до 10^{11} Гц. Оптический диапазон делится на видимый (В), ультрафиолетовый (УФ) и инфракрасный (ИК) (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Шкала электромагнитных излучений

Название	Границы диапазона λ , нм
гамма-излучение	$\lambda < 1,2 \cdot 10^{-3}$
рентгеновское излучение	$1,2 \cdot 10^{-3} < \lambda < 12$
ультрафиолетовое излучение	$12 < \lambda < 380$
видимый свет	$380 < \lambda < 760$
инфракрасное излучение	$760 < \lambda < 10^6$
радиоволны	$\lambda > 10^6$

Оптическое излучение обусловлено колебаниями входящих в состав веществ электронов и ионов и обладает одновременно волновыми и корпускулярными свойствами. Возникновение оптического излучения связано с изменением энергетических состояний электронов в атоме, а также с колебательным и вращательным движениями молекул, входящих в состав

излучающего тела. Различают тепловое (температурное) и люминесцентное излучения.

Тепловое излучение – это излучение, возникающее вследствие теплового возбуждения атомов и молекул и испускаемое всеми телами при любых температурах выше абсолютного нуля. Тепловое излучение тела характеризуется его температурой и является равновесным: убывание энергии, а следовательно, и понижение температуры тела при излучении компенсируется за счет поглощения энергии. Тепловое излучение твердых и жидких тел имеет непрерывный спектр.

Люминесцентное излучение обусловлено возбуждением атомов и молекул вещества за счет любого вида энергии, кроме тепловой: энергии электрического тока, квантов света, химических реакций и т.д. Люминесцентное излучение сохраняется в течение некоторого времени ($\sim 10^{-10}$ с и более, вплоть до нескольких часов) после окончания вызвавшего его возбуждения.

Тепловое и люминесцентное излучения, вызванные спонтанными (самопроизвольными), не согласованными между собой по частоте и фазе переходами частиц с высоких энергетических уровней на более низкие уровни, являются некогерентными и ненаправленными в пространстве. Разновидность люминесцентного излучения -- вынужденное (стимулированное) излучение, которое возникает под действием другого (вынуждающего) излучения. Вынужденное излучение характеризуется той же частотой и тем же направлением, что и вынуждающее излучение, а также согласовано с последним по фазе, т.е. оно когерентное, монохроматичное и направленное.

Свойства излучения различаются в зависимости от частотного диапазона.

Ультрафиолетовое излучение (УФ), обладающее наиболее мощными квантами, оказывает интенсивное фотохимическое, биологическое и фотоэлектрическое воздействие.

Видимое излучение (свет) непосредственно воспринимается глазом человека и позволяет получать информацию об окружающем мире. Кроме того, видимое излучение обладает значительным фотоэлектрическим и фотохимическим действием.

В инфракрасной области (ИК) излучения энергия кванта меньше, чем в УФ и видимой. Для ИК-излучения характерно тепловое действие.

6.2. Источники света

Источники оптического излучения можно разделить на две большие группы – искусственные (т.е. изготовленные человеком) и природные.

Искусственные источники являются активными, а природные могут быть как активными (Солнце, звезды, галактики), так и пассивными (Луна, атмосфера, поверхность Земли и т.п.).

Активные источники являются излучателями, а пассивные – лишь преобразуют (в частности, отражают) проходящий от активных источников свет.

Активные источники являются, по существу, преобразователями одного из видов энергии (в большинстве случаев электрической) в световую.

Черным телом (ЧТ) называется излучатель, поглощающий все падающее на него излучение. ЧТ является эталонным источником потока излучения.

6.2.1. Лампы накаливания

Электрической лампой накаливания (ЭЛН) называется источник излучения, получаемый в результате теплового излучения твердого тела, которое нагревает до высокой температуры проходящий через него электрический ток. ЭЛН широко применяют как источник света и источники излучения в ближней ИК-области.

К достоинствам ЭЛН следует отнести сплошной спектр, обеспечивающий во многих случаях приемлемую цветопередачу, отработанную технологию изготовления ламп в широком диапазоне мощностей, малую стоимость, достаточно высокую надежность.

Недостатком ЭЛН является низкая световая отдача (световой КПД осветительных ламп составляет 1-3%). ЭЛН существенно отличается от спектрального состава солнечного излучения.

6.2.2. Галогенные лампы

Галогенная лампа накаливания представляет собой лампу, в колбу которой вводится небольшое количество галогена, обычно йода или брома. Распыляемый нитью вольфрам соединяется с галогеном, в результате чего образуется газообразное вещество – галогенид вольфрама. Эта реакция присоединения происходит при температуре 573 К, близкой к температуре колбы. При температуре, близкой к температуре нагретой нити лампы, галогенид вольфрама распадается на галоген и восстановленный вольфрам, который частично оседает на спирали. Такое возвращение распыленного вольфрама на спираль лампы устраняет его напыление на стенки колбы и удлиняет срок службы лампы. Лампы накаливания с галогенным циклом имеют срок службы в два-три раза больший, чем обычные лампы, а при одинаковом сроке службы имеют более высокую световую отдачу и меньшие размеры тела накала. Температуру нити можно довести до 3400 К.

6.2.3. Газоразрядные лампы

Это тип осветителя, в котором светоизлучение происходит при протекании в газовых соединениях при определенном давлении электрического разряда. Источником светового потока может являться либо сама электрическая дуга, либо люминофор, покрывающий изнутри колбу с газом.

Преимущества таких ламп:

- компактный размер;
- высокая светоотдача;
- устойчивость к изменениям во внешней среде (потому их легко можно использовать под открытым небом);
- работа при температуре ниже нуля;
- высокий ресурс работы;
- экономичность.

Недостатки:

- линейчатый спектр излучения;
- длительный переход на номинальный режим;
- пульсация светового потока;
- шум пускорегулирующей аппаратуры;
- вредность паров ртути в случае попадания в помещение при разрушении колбы.

6.2.4. Светодиоды

Принцип действия излучающего светодиода (СИД) основан на явлении инжекционной электролюминесценции при протекании тока в прямом направлении в структурах с p/n-переходом.

Площадь излучающей поверхности СИД не превышает нескольких квадратных миллиметров.

Полупроводниковую структуру СИД помещают в пластмассовый или металлический корпус с окном (линзой) для выхода излучения. Размеры СИД с арматурой для включения составляют несколько миллиметров.

Наиболее существенный недостаток СИД состоит в разбросе параметров от образца к образцу и в их зависимости от температуры.

6.2.5. Лазеры

Физической основой работы лазеров является усиление света с помощью вынужденного излучения, наблюдаемого в квантовых системах при определенных условиях.

Для изготовления оптических деталей применяют оптическое стекло – бесцветное и цветное, кварцевое оптическое стекло, некоторые кристаллы, пластмассы и другие материалы.

Основные характеристики оптических материалов:

- показатель преломления;
- спектральный диапазон и коэффициент пропускания.

6.3. Оптические детали

6.3.1. Линзы

Линза – это оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью вращения. Наиболее распространенными в оптических системах являются линзы со

сферическими центрированными поверхностями. Реже применяют линзы, одна или обе поверхности которых – асферические, например, параболическая, эллиптическая, цилиндрическая и др.

Все линзы делят на три группы:

- положительные (собирающие) линзы, имеющие положительные задние фокусные расстояния;
- отрицательные (рассеивающие) линзы, имеющие отрицательные задние фокусные расстояния.

6.3.2. Линзы Френеля

Линзы Френеля – это оптические элементы, имеющие ступенчатую поверхность. Они широко используются в датчиках, где не требуется высокого качества фокусировки, в световых конденсорах, увеличителях и устройствах фокусировки детекторов присутствия. Линзы Френеля изготавливаются из стекла, полиметилметакрилата (оргстекло, для видимого и ближнего ИК диапазона) и полиэтилена (для дальнего ИК диапазона).

6.3.3. Свето пропускающие окна

Основные функции окон заключаются в следующем:

- защита внутренних частей датчика от влияния окружающей среды;
- передача световых лучей в определенном диапазоне волн с минимальными потерями и искажениями.

Окна могут быть выполнены в виде плоских пластин или частей сфер. Для уменьшения оптических потерь на одну или две поверхности окна могут наноситься специальные покрытия (так называемое «просветление»). Такие покрытия придают окну голубоватый, фиолетовый или желтый оттенок и часто применяются при изготовлении фотографических линз.

6.3.4. Зеркала

Плоские зеркала с наружным или внутренним отражающим покрытием, нанесенным соответственно на переднюю или заднюю поверхность плоскопараллельной стеклянной пластинки, – подложки, применяются в оптических системах для изменения направления или смещения оптической оси, разделения пучка лучей, для оборачивания изображения.

Сферические зеркальные поверхности находят применение в оптических системах различного назначения (в осветительных и проекционных системах, в объективах фотоэлектрических следящих устройств и т.п.). Сферические зеркала, действие которых эквивалентно действию линз, позволяют получить более компактные системы по сравнению с линзовыми системами. Применение зеркальных поверхностей в ряде случаев более предпочтительно, чем применение преломляющих поверхностей вследствие отсутствия хроматических аберраций.

6.3.5. Волоконные световоды

Оптическое волокно – стеклянный пруток обычно круглого поперечного сечения диаметром от 5–6 мкм до 0,3 мм с полированными боковой поверхностью и торцами, предназначенный для передачи излучений оптического диапазона на основе явления полного внутреннего отражения от боковой поверхности. Волокна собираются в жгуты-световоды, которые могут изгибаться без нарушения пропускания излучения при минимальном радиусе кривизны изгиба, превышающем в 50 раз (при изгибе в горячем состоянии) и 300 раз (при изгибе в холодном состоянии) диаметр отдельного волокна. Для обеспечения условий полного внутреннего отражения и уменьшения потерь излучения оптическое волокно делают составным. Оно состоит из сердцевины, выполненной из материала с большим показателем преломления, и оболочки из материала с малым показателем преломления. Оболочка предохраняет поверхность сердцевины от повреждений, загрязнений и препятствует рассеянию и проникновению излучения из соседних волокон.

6.3.6. Покрытия, поглощающие тепловое излучение

Все датчики тепловых излучений, как активные, так и пассивные, построены на принципе поглощения или излучения электромагнитных волн в дальней ИК области спектра. Для эффективной работы датчиков либо специальным образом обрабатывают поверхность датчика для повышения его коэффициента излучения, либо с той же целью на нее наносят покрытие, обладающее высокой излучающей способностью. У таких покрытий должна быть хорошая теплопроводность и очень низкая теплоемкость. Это значит, что их следует изготавливать очень тонкими.

Наиболее эффективным способом создания материала с высокой поглощающей (излучающей) способностью является формирование на нем пористой поверхности, поскольку частицы размером, гораздо меньшим длины волны, как правило, преломляют или поглощают лучи света.

7. ДЕМПФИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Подвижные системы многих показывающих и самопишущих измерительных приборов представляют собой упругие системы с подвижными массами. В результате резкого изменения измеряемой величины, а также при толчках и ударах нарушается равновесие подвижной системы прибора и возникают ее собственные (свободные) колебания. Эти колебания в показывающих приборах затрудняют быстрое и точное снятие отсчета измеряемой величины, а в самопишущих приборах, накладываясь на записываемые колебания измеряемой величины, искажают ее запись.

С целью уменьшения амплитуды и продолжительности собственных колебаний подвижной системы прибора применяются устройства, называемые успокоителями или демпферами.

Демпфирующими устройствами (успокоителями) называют устройства, создающие моменты или силы, приложенные к подвижным системам

приборов, пропорциональные скорости их движения и направленные против этого движения. Демпфирующие устройства служат для оптимизации динамических параметров приборов и снижения длительности переходного процесса.

Основные требования, предъявляемые к демпферам, касаются стабильности коэффициента демпфирования или степени успокоения, создаваемых демпфером в процессе функционирования прибора. Демпфирующие устройства должны создавать силы относительно подвижной системы прибора, пропорциональные только скорости ее движения, и не создавать сил упругости и сил трения, а также должны обеспечивать регулировку величины коэффициента демпфирования.

В приборах применяют следующие виды успокоителей (рисунок 7.1):

$F_{усп} = \text{const}$ – постоянный успокоитель;

$F_{усп} = c\dot{x}$, - линейный успокоитель;

$F_{усп} = c\dot{x}^2$ - квадратичный успокоитель,

где c – коэффициент характеризующий вид системы.

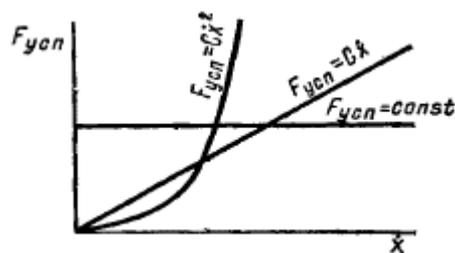


Рисунок 7.1 – Графическое представление характеристик демпферов

В большинстве успокоителей создается торможение, пропорциональное первой степени скорости движения подвижной системы.

7.1. Принцип действия успокоителя

На рисунке 7.2 изображена схема подвижной части показывающего устройства. Положение подвижной системы прибора определяется углом поворота α .

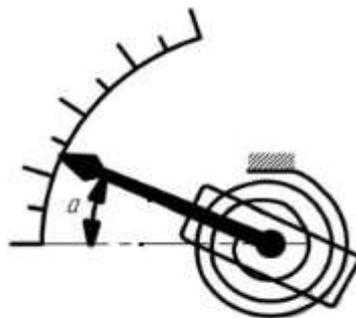


Рисунок 7.2 – Схема возникновения колебаний в подвижной системе

В состоянии покоя вращающий момент M_B , действующий на подвижную систему, уравнивается противодействующим моментом пружины $M_{II} = K \cdot a$ (K - жесткость пружины, численно равная моменту пружины при угле закручивания ее на 1 рад).

При выводе системы из равновесия нарушается равенство моментов M_B и M_{II} и возникает устанавливающий момент M_{Δ} , равный разности моментов M_B и M_{II} , который приводит систему в движение к новому положению равновесия. Движущая система, обладая кинетической энергией, перейдет за положение равновесия. При этом знак M_{Δ} изменится, система возвратится к положению равновесия и снова перейдет за него, и таким образом возникнут собственные (свободные) колебания системы. Для того чтобы эти колебания были затухающими, применяется успокоитель.

Возможны следующие частные случаи движения системы.

В первом случае система не имеет успокоителя, а моменты трения равны нулю. Если систему вывести из положения равновесия на угол, то затем она будет совершать незатухающие колебания по закону косинуса (рисунок 7.3а).

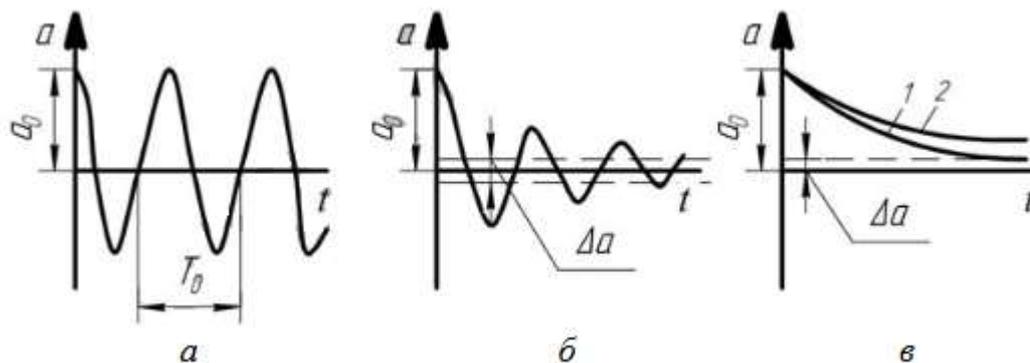


Рисунок 7.3 – поведение подвижной системы при различной степени успокоения

При наличии демпфера характер движения подвижной системы прибора полностью определяется степенью успокоения β и частотой собственных колебаний.

При $\beta < 1$ амплитуда колебаний будет с течением времени уменьшаться, т. е. колебания будут затухающими (рисунок 7.3б).

При $\beta = 1$ подвижная система без колебаний плавно подходит к положению равновесия (рисунок 7.3в, кривая 1).

При $\beta > 1$ система без колебаний, но более медленно будет приближаться к положению равновесия (рисунок 7.3в, кривая 2).

Движение системы при $\beta = 1$ и $\beta > 1$ называется аperiodическим.

Введение в систему успокоителя изменило частоту колебаний системы.

Следовательно, при $\beta < 1$ период $T > T_0$, но по мере приближения β к единице период T приближается к бесконечности; а колебательное движение системы - к аperiodическому.

Подвижная система практически считается успокоившейся, если ее колебания относительно положения равновесия не превышают достаточно малой заданной величины $\Delta\alpha$ (рисунок 7.3 б, в), измеряемой в радианах. Например, в электроизмерительных приборах $\Delta\alpha$ составляет не более 1 % от полной длины шкалы.

Обычно наименьшее время успокоения $t_{\text{усп}}$ получается при ($\beta < 1$, т. е. при затухающем колебательном движении системы).

7.2. Конструкции успокоителей

7.2.1. Воздушные успокоители.

В электроизмерительных и других приборах, в которых требуется небольшая величина коэффициента успокоения β , применяются воздушные успокоители двух типов: крыльчатые (рисунок 7.4а) и поршневые (рисунок 7.4б).

Поршневые успокоители прочнее крыльчатых и при равных площадях сечения камер имеют коэффициент успокоения на 25-30% больше, чем крыльчатые. Поршневые успокоители применяются и в приборах с прямолинейным движением подвижной системы.

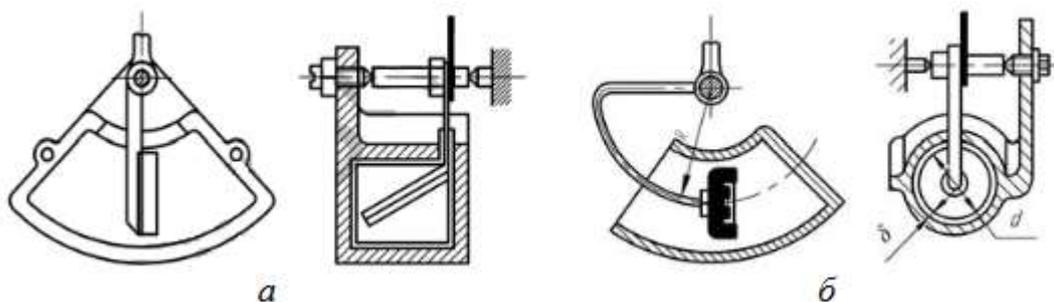


Рисунок 7.4 – конструкции воздушных успокоителей

Воздушный поршневой успокоитель показан на рисунке 7.4б. Он состоит из камеры и перемещающегося в ней поршня, который жестко соединен с подвижной системой прибора. Между поршнем и стенками цилиндра устанавливается зазор $S = 0.02-0.1$ мм. В воздушных успокоителях коэффициент S слабо зависит от изменения температуры, так как при этом коэффициент вязкости воздуха почти не изменяется.

Исследования показали, что успокоение зависит не только от скорости движения поршня (или крыла), но и от амплитуды его перемещения и рабочего объема цилиндра. При большой амплитуде и сравнительно низкой частоте колебаний системы обычно получается вполне достаточное успокоение. При больших частотах и сравнительно небольшой амплитуде колебаний при малых зазорах S вследствие сжимаемости воздуха успокоитель может действовать как дополнительная пружина и успокоение исчезнет.

К достоинствам воздушного успокоителя можно отнести:

- простота конструкции, надежность, удобство в эксплуатации:

- коэффициент успокоения почти не зависит от изменения температуры окружающей среды.

Недостатки:

- сжимаемость воздуха ведет к нарушению режима работы успокоителя;
- изменение давления воздуха на разных высотах от уровня моря.

7.2.2. Жидкостные успокоители.

Жидкостные успокоители имеют сравнительно большой коэффициент успокоения β . поэтому они применяются в самопишущих и других приборах с большими массами и моментами инерции подвижных систем.

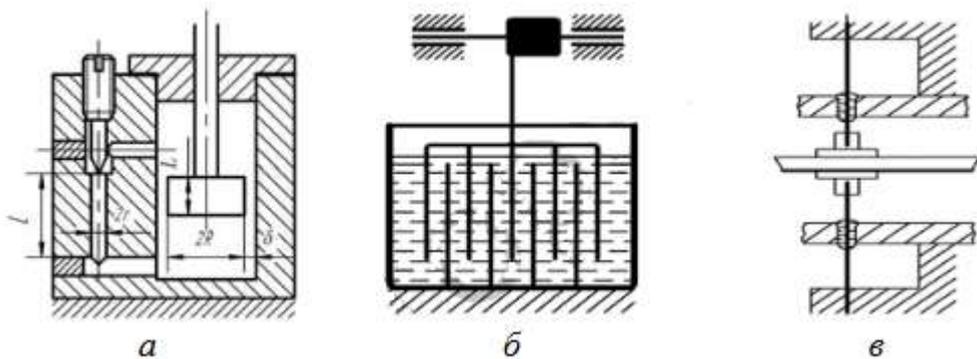


Рисунок 7.5 – конструкции жидкостного поршневого (а), пластинчатого (б) и капельного (в) успокоителей

Жидкостный поршневой успокоитель (рисунок 7.5) состоит из неподвижного цилиндра, заполненного жидкостью, в котором перемещается поршень, соединенный с подвижной системой прибора. При движении поршня создается разность давлений по обеим его сторонам и жидкость перетекает из одной полости цилиндра в другую через зазор S и капилляр радиусом r (рисунок 7.5а). Винтом можно изменять проходное сечение капилляра и регулировать величину коэффициента успокоения S .

Жидкостный пластинчатый успокоитель состоит из резервуара, наполненного жидкостью, и ряда движущихся в жидкости пластин, жестко соединенных с подвижной системой прибора (рисунок 7.5б).

Жидкостный капельный успокоитель, применяющийся для успокоения поперечных колебаний подвижной системы прибора на растяжках показан на рисунке 7.5в. Два отверстия, через которые проходят растяжки, заполняются каплями масла. Масло не тормозит вращение растяжек, но успокаивает их поперечные колебания.

Схема поплавкового гидравлического демпфера имеет следующий вид (рисунок 7.6).

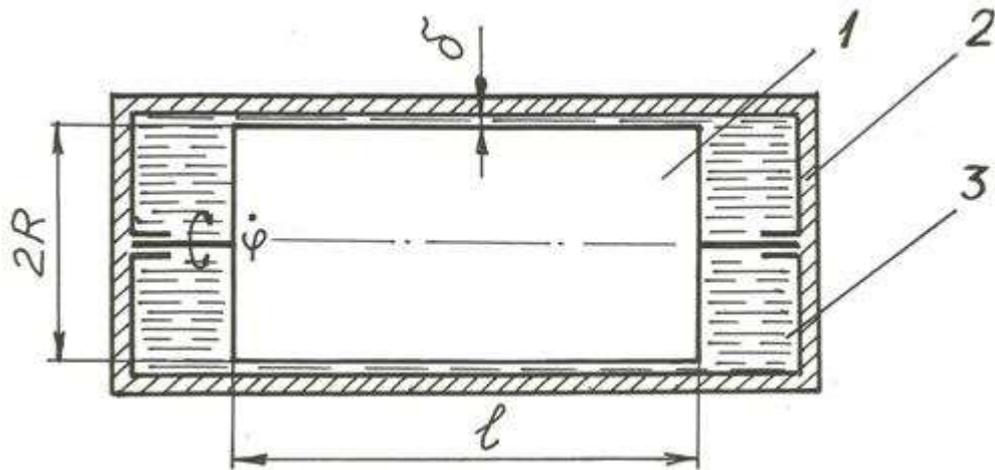


Рисунок 7.6 – Принципиальная схема поплавкового гидравлического демпфера

1 – поплавок; 2 – корпус; 3 – жидкость.

Демпфер представляет собой цилиндр 2, внутренняя полость которого заполнена жидкостью 3. В цилиндрическом корпусе 2 перемещается поплавок 1, связанный с подвижной системой. При перемещении относительно корпуса подвижной системы со скоростью за счет трения жидкости о поверхность поплавка возникает демпфирующий момент.

С целью увеличения коэффициента демпфирования при малых углах поворота подвижной системы (не более 1°) поверхности поплавка и цилиндра делают сложной формы, получая при этом зазор между поплавком и цилиндрическим корпусом в виде лабиринта (рисунок 7.7).

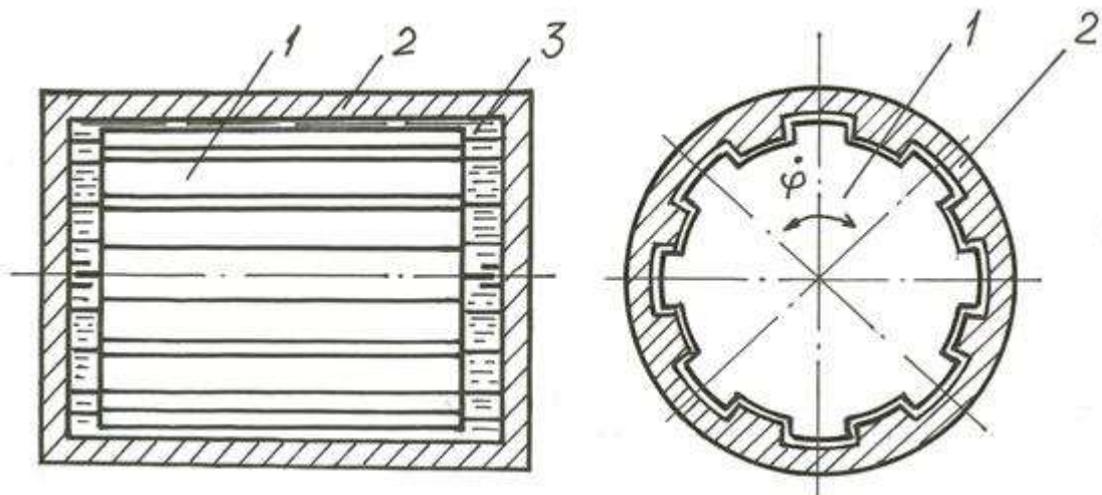


Рисунок 7.7 – Принципиальная схема поплавкового гидравлического демпфера с зазором в виде лабиринта

1 – поплавок; 2 – корпус; 3 – жидкость.

Преимуществом жидкостных успокоителей является возможность получения практически любого коэффициента затухания

Однако они имеют и недостатки:

- сложность конструкции, обеспечение герметичности демпфера;
- изменение коэффициента успокоения вследствие изменения вязкости жидкости при изменении температуры.

В успокоителях применяются трансформаторные и турбинные масла и их смеси, а также специальные жидкости, в том числе синтетические с малым температурным коэффициентом вязкости, отличающиеся высокой прозрачностью.

7.2.3. Магнитоиндукционные успокоители.

Магнитоиндукционные успокоители применяются в индукционных, магнитоэлектрических, электростатических и других приборах. Магнитоиндукционный успокоитель состоит из постоянного магнита или электромагнита 1 и движущегося в его зазоре металлического немагнитного элемента 2, связанного с подвижной системой прибора (рисунок 7.8).

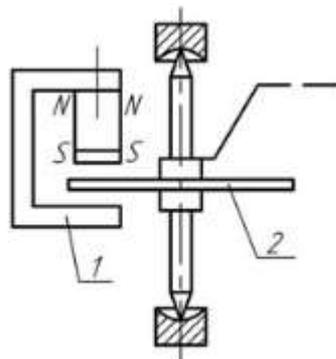


Рисунок 7.8 – Схема магнитоиндукционного демпфера

Успокаивающий момент создается тормозящими силами, возникающими между магнитным потоком, пронизывающим движущийся металлический элемент, и вихревыми токами, индуцированными в этом элементе. В зависимости от конструкции прибора и угла поворота его подвижной системы подвижный элемент успокоителя выполняется в виде диска или сектора из алюминия толщиной от 0,3 до 1 мм. Элемент проверяется на отсутствие ферромагнитных включений. Зазор между полюсом магнита и поверхностью элемента выполняется не менее 0,5 мм.

В индикаторах типа двухрамочного магнитоэлектрического логометра, применяемых в различных дистанционных приборах ЛА, магнит, закрепленный на подвижной системе прибора, находится внутри корпуса, изготовленного из меди, и за счет пересечения его своим магнитным полем при повороте оси подвижной системы в медном корпусе наводятся вихревые токи, вызывающие появление демпфирующего момента (рисунок 7.9).

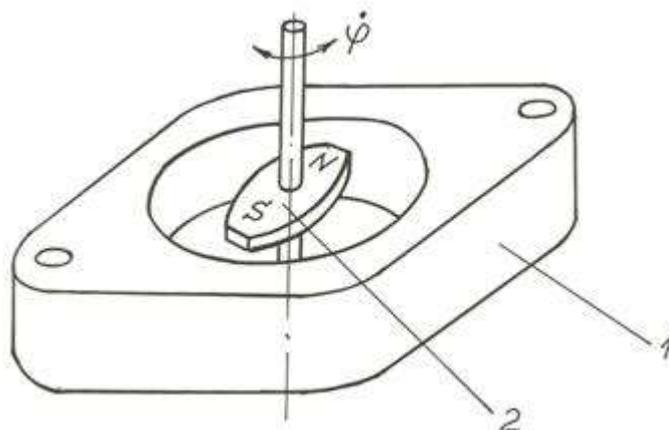


Рисунок 7.9 – Схема магнитоиндукционного демпфера логометра
1 – медный корпус; 2 – подвижная система.

К достоинствам магнитоиндукционных успокоителей относятся: независимость коэффициента β от изменения температуры; возможность регулировки величины коэффициента β ; возможность создания большого успокоения; надежность в работе. Недостатком успокоителей этого типа является их относительно большие габариты и масса из-за необходимости применения магнитов с большой индукцией в зазоре; воздействие магнитных полей на измерительные элементы прибора.

7.2.4. Фрикционные демпферы

Демпферы такого типа (рисунок 7.10) применяют в приборах, работающих в области высоких частот. Принцип их работы основан на использовании моментов сил и сил сухого трения.

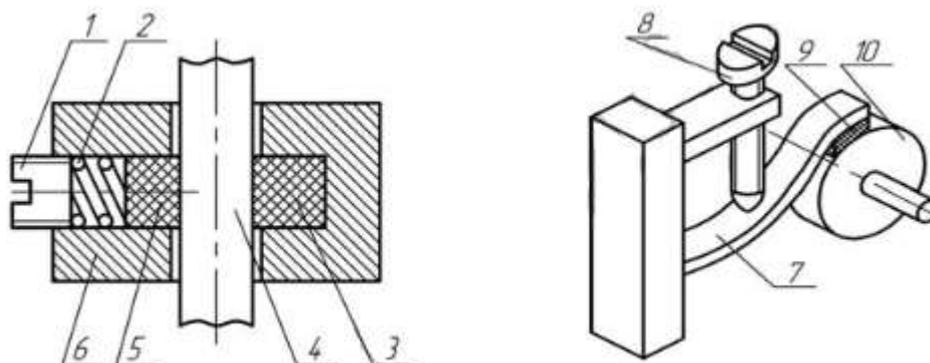


Рисунок 7.10 – Схема фрикционного демпфера:

- 1 – винт; 2 – пружина; 3 – неподвижный сухарик; 4 – направляющая; 5 – подвижный сухарик; 6 – корпус; 7 – упругая пластина; 8 – винт; 9 – фрикцион; 10 – диск

Ввиду сложности расчета таких типов устройств подбор коэффициентов ускорения в переходных процессах осуществляется эмпирическим путем в процессе настройки.

Демпфирующие устройства комбинированного типа представляют собой сочетание демпферов двух различных типов.

8. СХЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Большинство преобразователей неэлектрических величин в электрические являются активными. При изменении воспринимаемой величины они не вырабатывают электрическую энергию, а происходит изменение какого-либо электрического параметра – активного сопротивления (резистивные преобразователи), индуктивности (индуктивные преобразователи), емкости (емкостные преобразователи) и т.п.

Для дальнейшей работы необходимо преобразовать такой параметр в электрическое напряжение либо ток. При этом измерение емкости и индуктивности можно рассматривать как измерение реактивного сопротивления, пользуясь схемами, аналогичными схемам измерения активного сопротивления, но питая их переменным током или напряжением и используя соответствующие средства измерения.

8.1. Токовая схема

Простейшая схема с последовательным включением (делитель тока) резистивного первичного преобразователя R_x , источником питания $U_{\text{п}}$ и амперметром A показана на рисунке 8.1.

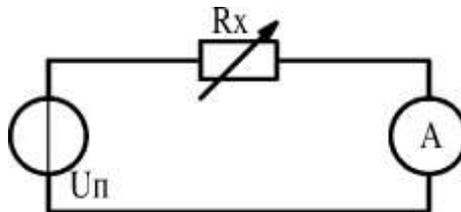


Рисунок 8.1 – Токовая схема измерения сопротивления

При изменении сопротивления R_x изменяется величина тока I в цепи, что регистрируется амперметром. Выходная величина будет равна:

$$I = \frac{U_{\text{п}}}{R_x}$$

Из приведенной формулы видно, что функция преобразования такой схемы будет нелинейной, а получить нулевое значение на выходе возможно только при крайне большом значении сопротивления R_x , что на практике встречается редко.

Достоинством такой схемы можно считать ее простоту и отсутствие дополнительных элементов.

Основным недостатком токовой схемы является необходимость протекания тока, величина которого должна быть достаточна для ее измерения во всем диапазоне. Протекание тока влечет за собой энергетические потери, а

также возможность нагрева измеряемого сопротивления и изменение его значения вследствие этого (явление саморазогрева).

Если значение сопротивления резистивного преобразователя в процессе работы может принимать малые значения, вызывающие большой ток, то для его уменьшения в цепь включается добавочное сопротивление R_d (рисунок 8.2)

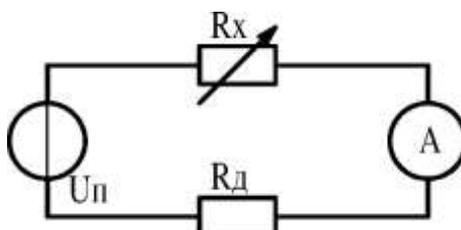


Рисунок 8.2 – Токовая схема с добавочным резистором

В таком случае выходная величина будет равна:

$$I = \frac{U_{\text{П}}}{R_x + R_d}$$

Значение R_d подбирается исходя из максимального тока, допустимого для источника питания и резистивного преобразователя:

$$I_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{П}}}{R_d}$$

8.2. Схема делителя напряжения

В данной схеме (рисунок 8.3) резистивный преобразователь последовательно с добавочным сопротивлением подключается к источнику напряжения. Выходным параметром такой схемы является напряжение, снимаемое с выводов резистивного преобразователя.

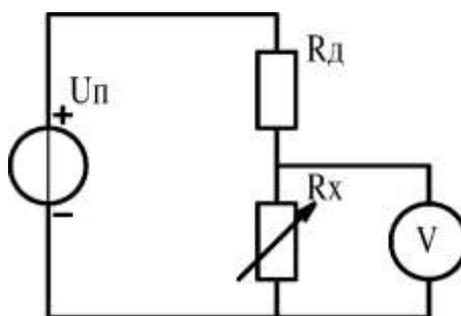


Рисунок 8.3 – Схема делителя напряжения

Если сумма R_d и R_x в любой момент времени намного больше нуля, то ток данной схемы можно пренебречь.

Выходное напряжение данной схемы рассчитывается по формуле:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{П}} \times \frac{R_x}{R_d + R_x}$$

Выходное напряжение схемы может принимать значение, равное нулю, но только в случае $R_x = 0$, что возможно лишь для крайне малого количества резистивных преобразователей.

Достоинством такой схемы является отсутствие протекания тока, что снижает потребляемую мощность и исключает возможность саморазогрева резистивного преобразователя.

Недостатками являются ее нелинейность и невозможность установки на нуль при любых значениях сопротивления преобразователя.

При наличии у резистивного преобразователя дифференциального выхода, т.е. двух выходных каналов, на одном из которых значение увеличивается, а на другом уменьшается на ту же величину, его можно подключать следующим образом (рисунок 8.4)

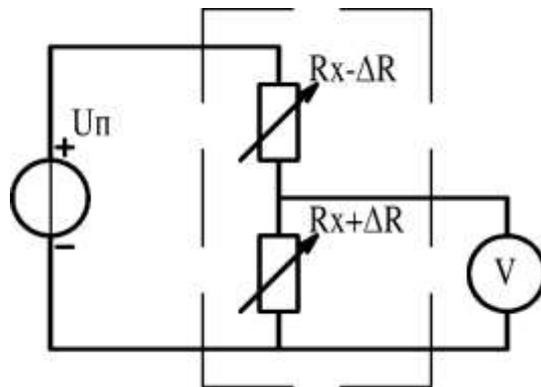


Рисунок 8.4 – Схема подключения дифференциального резистивного преобразователя в схему делителя напряжения

При таком подключении функция преобразования схемы будет линейной.

8.3. Дифференциальная схема

Данная схема (рисунок 8.5) аналогична схеме делителя напряжения, но содержит два источника напряжения, включенных последовательно. Выходное напряжение измеряется между средней точкой источников напряжения и точкой соединения сопротивлений.

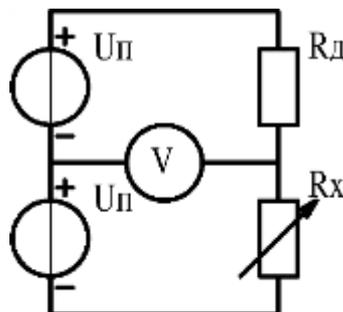


Рисунок 8.5 – Дифференциальная схема

Выходное напряжение такой схемы рассчитывается как

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} \times \frac{R_x - R_d}{R_x + R_d}$$

Таким образом, при равенстве R_d и R_x выходное напряжение будет равно нулю. Это позволяет установить схему на нуль при любом значении сопротивления измерительного преобразователя.

Аналогично схеме делителя напряжения, дифференциальная схема имеет линейную функцию преобразования при подключении дифференциального резистивного преобразователя и нелинейную при подключении одиночного.

Основным недостатком данной схемы является необходимость в двух источниках питания.

8.4. Мостовая схема

8.4.1. Принцип работы мостовой схемы

Мостовая измерительная схема (мост Уитстона) является частным случаем дифференциальной и позволяет привести значение выходного напряжения к нулю при любом значении сопротивления измерительного преобразователя, но не требует двух источников питания (рисунок 8.6).

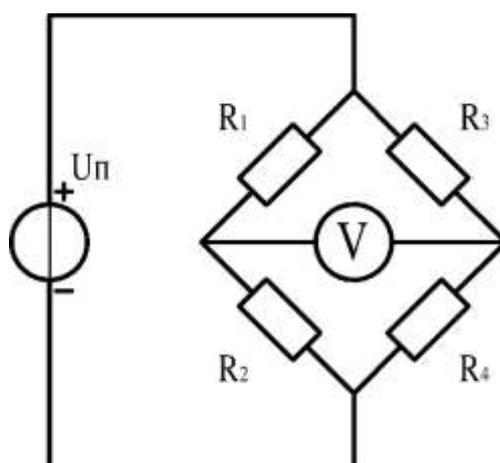


Рисунок 8.6 – Мостовая измерительная схема

Выходное напряжение мостовой схемы определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} \times \frac{R_2 \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_1 + R_2) \times (R_3 + R_4)}$$

При выполнении условия $R_2 \times R_3 = R_1 \times R_4$ выходное напряжение будет равно нулю. Данное выражение называют условием равновесия (баланса) моста. При его выполнении мост называется уравновешенным (сбалансированным), а его выходное напряжение равно нулю. При невыполнении условия равновесия ($R_2 \times R_3 \neq R_1 \times R_4$) мост называется несбалансированным (неуравновешенным) и его выходное напряжение отлично от нуля.

Выходное напряжение моста является нелинейной функцией разбаланса моста. Для малых значений разбаланса, довольно часто встречающихся на

практике, эту функцию можно считать квазилинейной. Чувствительность моста зависит от значения отношений (R_1/R_2) и (R_3/R_4) . Считая, что $k = R_1/R_2$ можно рассчитать значения чувствительности моста для некоторого диапазона значений k (рисунок 8.7)

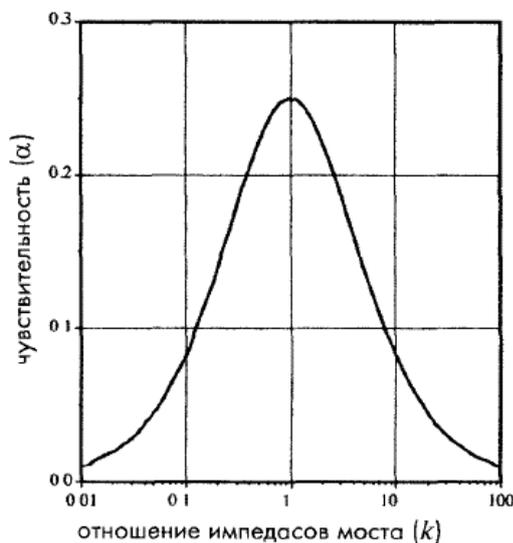


Рисунок 8.7 – Зависимость чувствительности моста от отношения сопротивлений

Из графика видно, что максимальная чувствительность достигается при $k = 1$, а в диапазоне $0.5 < k < 2$ чувствительность падает относительно медленно.

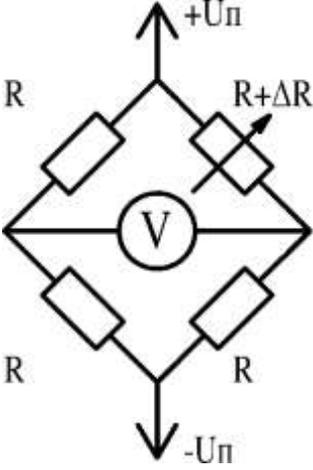
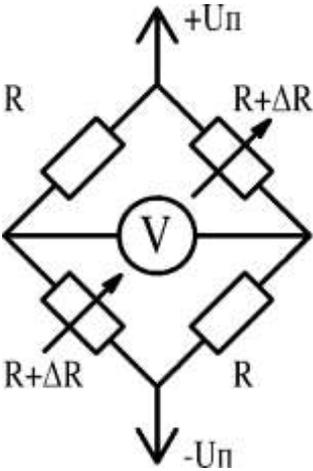
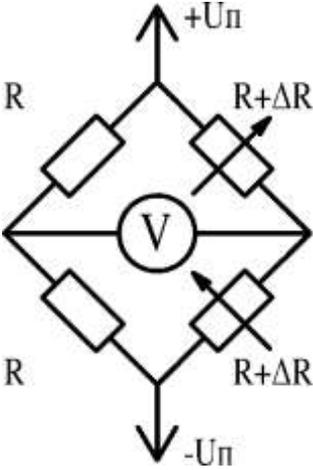
Следовательно, наибольшая чувствительность мостовой схемы достигается при условии $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$. Такой мост называется равноплечим.

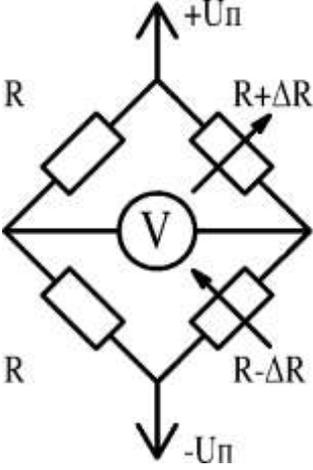
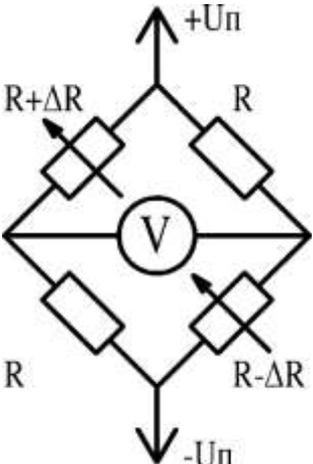
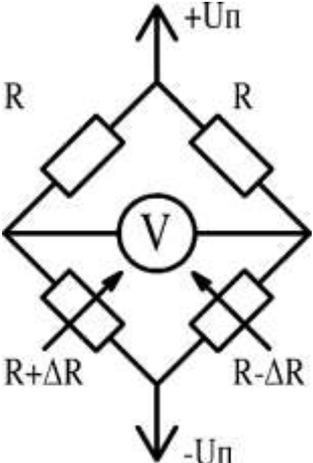
8.4.2. Подключение измерительных преобразователей в мостовую схему

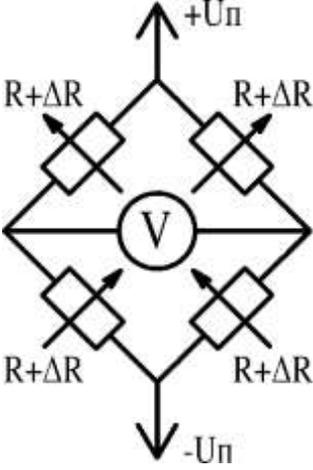
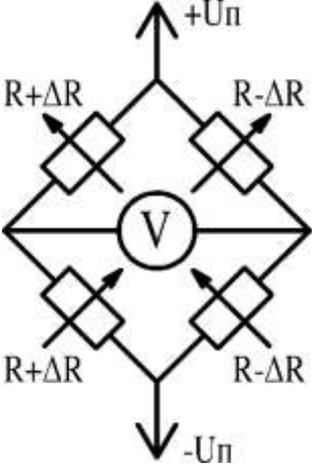
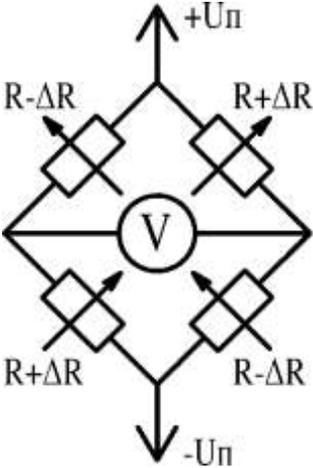
Возможные варианты подключения измерительных преобразователей в равноплечую мостовую схему приведены в таблице 8.1. Мостовая схема может использоваться для работы с одним или несколькими одиночными или дифференциальными преобразователями.

Таблица 8.1 – Подключение измерительных преобразователей в мостовую схему

№	Схема	Значение выходного напряжения
---	-------	-------------------------------

1.		$U_{\pi} \times \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)}$
2.		$U_{\pi} \times \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}$
3.		<p style="text-align: center;">0 Схема не работоспособна</p>

4.		$U_n \times \frac{\Delta R}{2R}$
5.		$U_n \times \frac{\Delta R^2}{(2R + \Delta R)(2R - \Delta R)}$
6.		$U_n \times \frac{2R}{(2R + \Delta R)(2R - \Delta R)}$

7.		<p style="text-align: center;">0</p> <p style="text-align: center;">Схема не работоспособна</p>
8.		<p style="text-align: center;">0</p> <p style="text-align: center;">Схема не работоспособна</p>
9.		$U_{\pi} \times \frac{\Delta R}{R}$

Схемы, у которых измерительный преобразователь включен в одно плечо называются четвертьмостовыми, в два плеча – полумостовыми, в четыре – полномостовыми.

Чувствительность полумостовых схем в два раза больше, чем четвертьмостовых. Чувствительность полномостовой схемы в два раза больше чувствительность полумостовой.

Выходное напряжение схем 3, 7 и 8 всегда равно нулю, независимо от значения сопротивления измерительного преобразователя. Это происходит из-

за того, что сопротивления обеих диагоналей изменяются одинаково и их произведения (по уравнению баланса моста) остаются равными друг другу.

Схемы 4 и 9 имеют линейную функцию преобразования, остальные рабочие схемы – нелинейную.

Схемы 5 и 6 на практике не применяются, поскольку схема 4 использует аналогичный им дифференциальный преобразователь, но обладает линейностью и большей чувствительностью.

Схемы 4, 6 и 9 обладают частичной температурной компенсацией. Изменение сопротивления всех измерительных преобразователей на одинаковую величину в уравновешенной схеме, вызванное влиянием внешних факторов (в первую очередь температуры) не вызовет ее разбалансировки. Такое же изменение в неуравновешенной схеме вызовет изменение ее выходного напряжения.

Для возможности установки мостовой схемы на нуль и компенсации погрешностей сопротивлений измерительных преобразователей и постоянных резисторов с нее включается подстроечное (балансирующее) сопротивление $R_6 \approx 0,1R$ (рисунок 8.8)

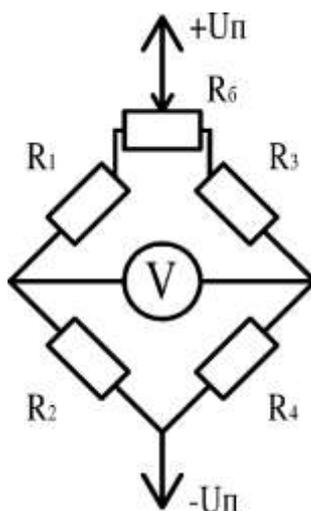


Рисунок 8.8 – Мостовая схема с балансирующим сопротивлением

Резистивные мостовые схемы часто используются при работе со струнными датчиками, пьезорезистивными преобразователями давления, термисторными термометрами и другими преобразователями. Подобные устройства также нашли свое применение при работе с емкостными и магнитными датчиками, измеряющими давление, перемещение, влажность и т.д.

8.4.3. Режимы работы мостовой схемы

Неуравновешенный мост

Мостовая схема часто работает в режиме несбалансированного моста. При включении в одно из плечей такого моста преобразователя получим

измерительную систему, основанную на принципе рассогласования. Этот принцип заключается в определении напряжения в диагонали моста.

Уравновешенный мост (метод балансировки)

В этом режиме работы мостовая схема в любой момент времени должна находиться в уравновешенном состоянии. Для выполнения условия баланса моста одновременно с изменением сопротивления измерительного преобразователя R_x должно изменяться балансировочное сопротивление R_6 , включенное в соседнее плечо (рисунок 8.9).

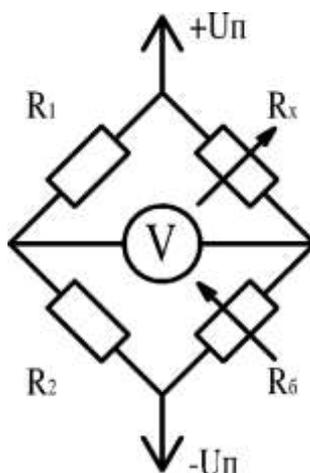


Рисунок 8.9 – Мостовая схема для измерения методом нуль-балансировки

Изменение величины сопротивления R_x определяется изменением балансировочного сопротивления R_6 .

Данный метод измерения характеризуется линейностью, высокой чувствительностью и точностью (благодаря возможности применения точных средств измерения выходного напряжения с малым диапазоном).

Изменение балансировочного сопротивления может происходить как вручную, так и автоматически компенсационной схемой (метод автоматически уравновешиваемого моста).

8.4.4. Мосты переменного тока

Предварительное уравновешивание мостов переменного тока отличается тем, что оно должно производиться по двум составляющим, так как реально изготовленные преобразователи всегда имеют некоторый разброс как активной, так и реактивной составляющих сопротивлений. Таким образом при измерении реактивного сопротивления мост переменного тока должен содержать помимо измеряемого Z_x еще балансировочное реактивное сопротивление, включенное в соседнее плечо моста. Для удобства балансировки дополнительных реактивных сопротивлений может быть два: основное Z_0 , номинальное значение которого соответствует начальному для измерительного преобразователя и балансировочное Z_6 (рисунок 8.10)

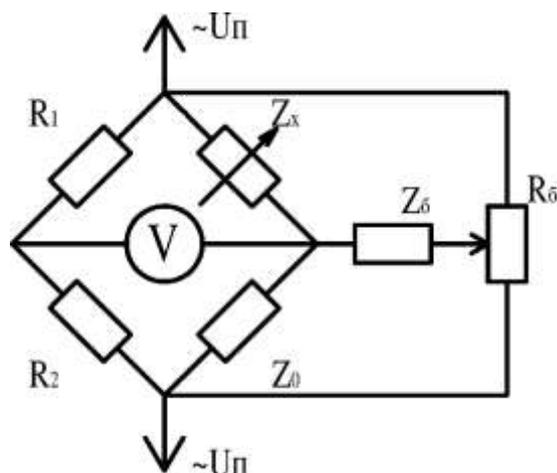


Рисунок 8.10 – Мостовая схема переменного тока с балансировкой активной и реактивной составляющих

В качестве балансирующего реактивного сопротивления $Z_б$ обычно используют конденсатор.

При выборе реактивного сопротивления Z_0 обычно руководствуются следующим правилом. Если смежные плечи имеют чисто активные сопротивления, то сопротивления двух других смежных плеч могут иметь или индуктивный или емкостный характер. Если противоположные плечи имеют чисто активные сопротивления, то одно из двух других должно быть индуктивным, а второе – емкостным.

Очень важной особенностью неравновесных мостов переменного тока по сравнению с неравновесными мостами постоянного тока является совершенно различный характер изменения показаний фазонечувствительного указателя в районе точки равновесия.

Так, в неравновесном мосте постоянного тока при изменении R_x от $R_1 = 0$ до $R_1 \approx R_0$ при котором наблюдается $U_n = 0$, и далее до $R_1 \rightarrow \infty$ напряжение U_n изменяется по кривой $U_n = f(R_x)$ (рисунок 8.11 а) При $R_x > R_0$ напряжение имеет один знак, при $R_x = R_0$ оно становится равным нулю, а при $R_x < R_0$ получает другой знак, и это изменение вблизи $R_1 = R_0$ можно считать линейно зависящим от $\Delta R = R_1 - R_0$.

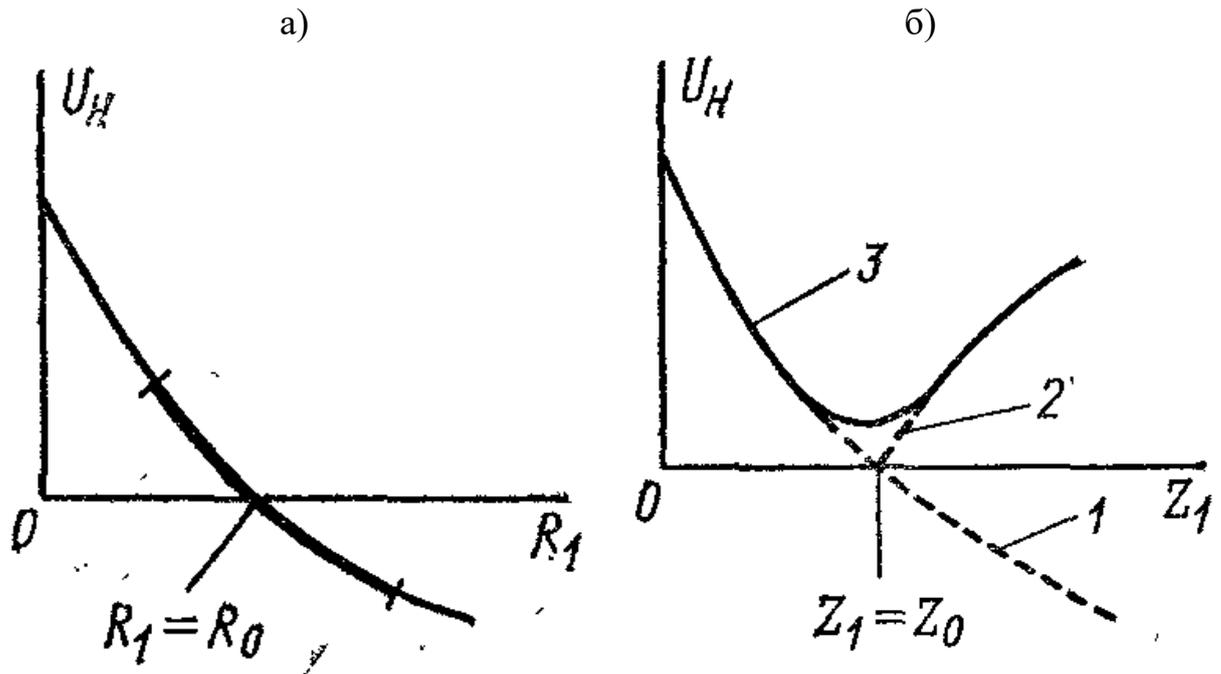


Рисунок 8.11 – Зависимость выходного напряжения моста постоянного (а) и переменного (б) тока

У моста же переменного тока выходное напряжение $U_H = f(Z_1)$ изменяется в принципе так же, т. е. по кривой 1 (рисунок 8.11б), однако в точке $Z_1 = Z_0$ на 180° изменяется фаза этого напряжения. Поэтому при использовании фазонечувствительных указателей переменного тока (транзисторный вольтметр, выпрямительный, электромагнитный, электростатический и другие приборы) их показания должны были бы изменяться по штриховой кривой 2 (рисунок б), т. е. сначала убывать до нуля, а затем вновь возрастать. Однако вследствие ряда обстоятельств (некоторая нелинейность сопротивлений плеч моста, недостаточно строго синусоидальная форма кривой питающего напряжения и др.) в выходном напряжении моста всегда присутствуют более высокие гармоники питающего напряжения. Поэтому в тот момент, когда $Z_1 = Z_0$ и мост уравновешен по основной волне, он оказывается неуравновешенным по более высоким гармоникам (второй, третьей и т. д.) и его выходное напряжение U_H , а следовательно, и показание фазонечувствительного указателя будут отличными от нуля. В результате этого изменение $U_H = f(Z_x)$ происходит по сплошной кривой 3 (рисунок б), которая при $Z_1 = Z_0$ не достигает $U_H = 0$, а лишь имеет достаточно пологий минимум.

В результате этого:

а) нет возможности определить по показаниям указателя знак отклонения $\Delta Z = Z_x - Z_0$;

б) чувствительность моста при $Z_x - Z_0$ оказывается равной нулю, из-за чего предварительное уравновешивание моста удается выполнить лишь

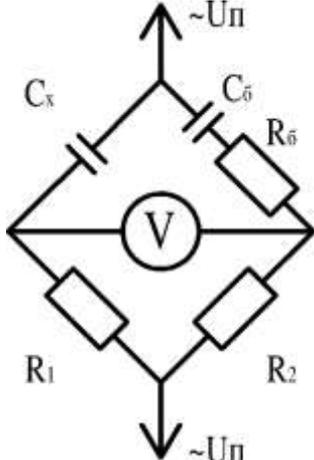
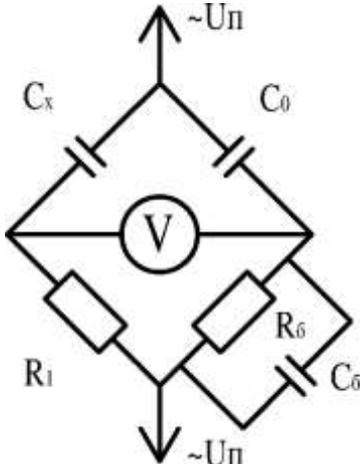
приблизенно и точка, от которой начинается отсчет показаний, «расплывается» в область;

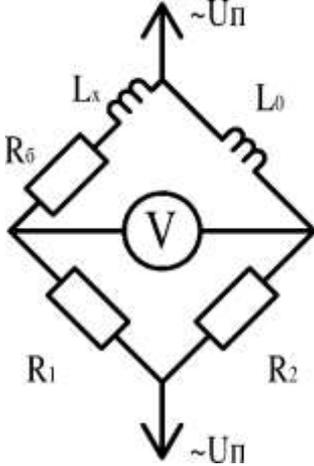
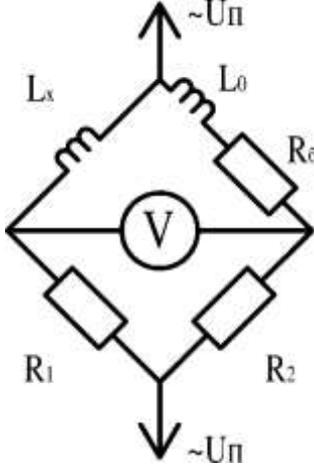
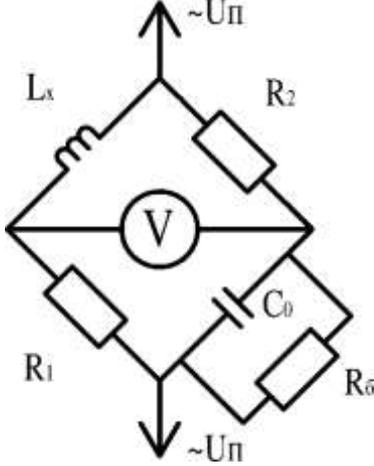
в) характеристика моста (кривая 3) получается нелинейной и не проходит через нуль.

Избавиться от всех этих недостатков позволяет использование фазочувствительных указателей. Такие указатели нечувствительны к напряжениям иных частот, кроме частоты основной волны, а при изменении фазы основной волны на противоположную меняют знак отклонения, т. е. практически полностью воспроизводят характеристику рисунка а, аналогичную характеристике мостов постоянного тока. Поэтому неравновесные мосты переменного тока чаще всего используются в сочетании с фазочувствительными указателями.

Для измерения реактивных сопротивлений применяются следующие типовые схемы мостов (таблица 8.2).

Таблица 8.2 – Мостовые схемы для измерения емкости и индуктивности

№	Описание	Схема
1	<p>Мост для измерения емкости C_x с балансирующими конденсатором C_0 и резистором R_0. Применяется для емкостей с малыми потерями.</p>	
2	<p>Мост для измерения емкости C_x с балансирующими конденсаторами C_0, C_0 и резистором R_0. Применяется для емкостей с большими потерями.</p>	

3	<p>Мост для измерения индуктивности L_x с образцовой индуктивностью L_0 и балансирующим резистором R_6.</p> <p>Применяется в случае $R_x < R_0$, где R_x и R_0 – активные сопротивления измеряемой и образцовой индуктивностей</p>	
4	<p>Мост для измерения индуктивности L_x с образцовой индуктивностью L_0 и балансирующим резистором R_6.</p> <p>Применяется в случае $R_x > R_0$, где R_x и R_0 – активные сопротивления измеряемой и образцовой индуктивностей</p>	
5	<p>Мост для измерения индуктивности L_x с образцовой емкостью C_0 и балансирующим резистором R_6.</p>	

9. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Они могут использоваться как самостоятельно, так и входить в состав других датчиков, в которых перемещения отдельных элементов вызываются воздействием на них различных сил, давления, температуры и т.д.

9.1. Реостатные преобразователи

Реостатным преобразователем перемещения называется прецизионный реостат, движок которого перемещается под действием измерительной величины.

Входной величиной преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, а выходной - изменение его сопротивления.

Реостатные преобразователи перемещения применяются в качестве промежуточных элементов измерительных и регулирующих устройств.

Реостатные датчики перемещений обычно используют для измерения перемещений от нескольких миллиметров до десятков метров и углов от нескольких градусов до 360° .

Для преобразования измеряемой механической величины в перемещение движка реостатного преобразователя используют различные преобразователи механического сигнала.

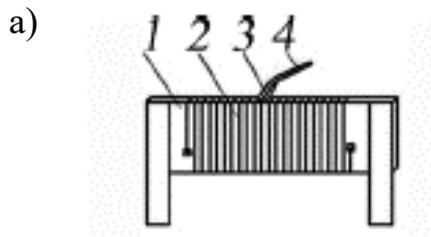
Преимуществом реостатных датчиков является возможность получения достаточно большого выходного сигнала, причем реостатный преобразователь датчика может питаться как постоянным, так и переменным током. Реактивное сопротивление реостатного преобразователя весьма мало (малы собственные индуктивности и емкости) в диапазоне частот, верхняя граница которого составляет несколько килогерц.

Большая величина выходного сигнала часто позволяет проводить дальнейшую его обработку и регистрацию без применения дополнительных усилительных устройств, снижающих точность результатов измерений.

9.1.1. Конструкции реостатов

Простейший реостат представляет собой каркас, изготовленный из изоляционного материала, с нанесенным токопроводящим покрытием или намотанной тонкой проволокой, с высоким удельным сопротивлением, по которому (ой) перемещается токосъемный движок.

Наиболее распространенными являются проволочные реостатные преобразователи, которые в зависимости от конструктивного исполнения делятся на преобразователи с поступательным и преобразователи с вращательным перемещением подвижного элемента (рисунок 9.1).



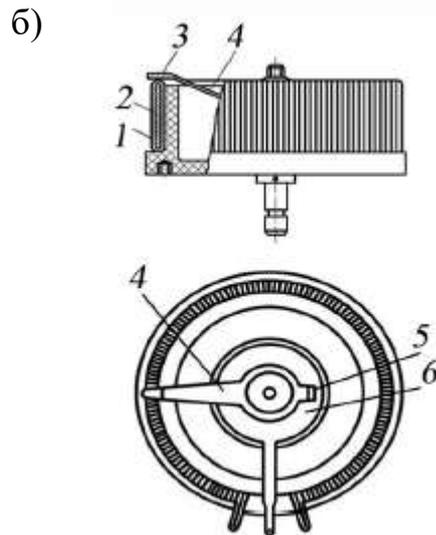


Рисунок 9.1 – Конструкция реостатов с поступательным (а) и вращательным (б) перемещением

Преобразователи с поступательным перемещением (рисунок 9.1а) изготавливаются обычно на стержневых, трубчатых или пластинчатых каркасах 1, на которые намотана с заданным шагом или виток к витку изолированная резистивная проволока, образующая чувствительный элемент 2. Подвижным элементом является контактная щетка, состоящая из контакта 3 и контактодержателя 4.

Преобразователи с вращательным перемещением подвижной части могут быть однооборотными или многооборотными. Однооборотные (рисунок 9.1б) имеют чувствительный элемент в виде обмотки 1, нанесенной на кольцевой каркас 2. Подвижный элемент такого преобразователя состоит из контактной токосъемочной щетки 3, укрепленной на щеткодержателе 4. Токосъем осуществляется при помощи контактной пружины 5, скользящей по неподвижному токосъемочному кольцу 6.

Многооборотные реостатные преобразователи делятся на два вида.

Многооборотный преобразователь (рисунок 9.2) обладает расширенным диапазоном входных величин, достигающим 25-40 оборотов. На алюминиевый спиралевидный каркас наматывается проволочная обмотка.

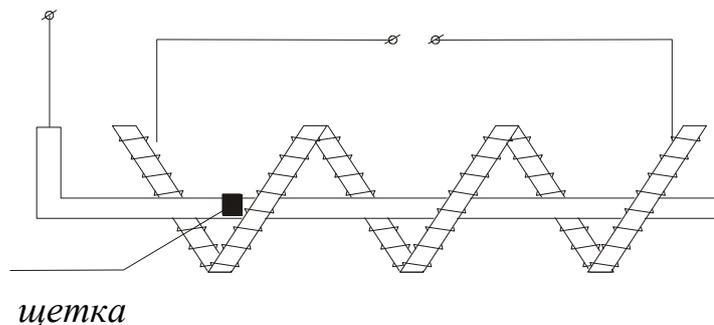


Рисунок 9.2 – Конструкция многооборотного реостатного преобразователя

Щетка, совершая вращательное и поступательное движения, скользит по поверхности провода. При равномерной намотке провода статическая характеристика преобразователя имеет линейный характер.

Многообходный преобразователь (рисунок 9.3а) состоит из кольцевого каркаса, на который равномерно намотана обмотка. При вращении подвижного контакта сопротивление возрастает от нуля до максимальной величины (рисунок 9.3б). При прохождении контакта вне зоны обмотки сигнал отсутствует.

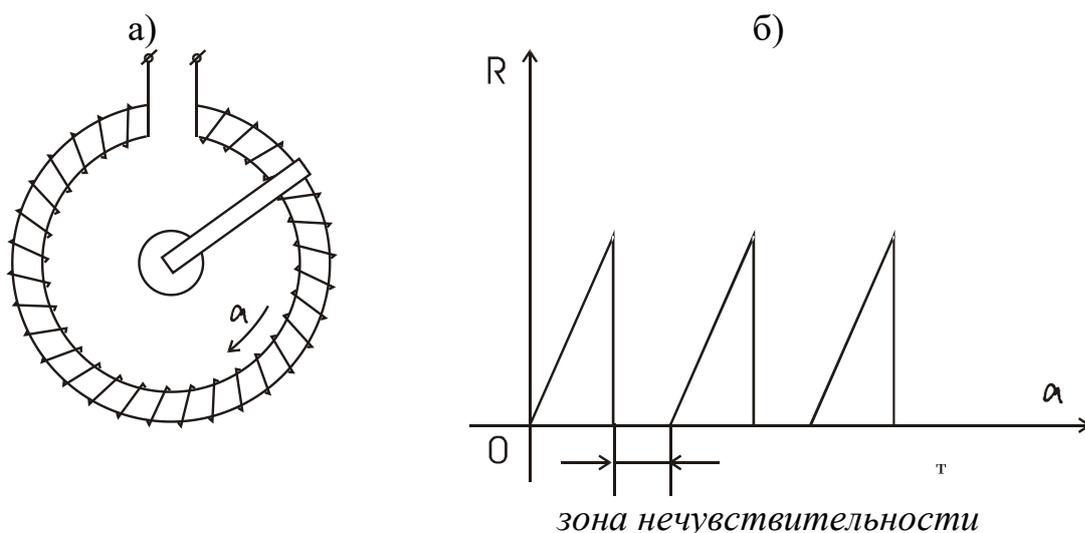


Рисунок 9.3 – Многообходный реостатный преобразователь:
а) конструкция; б) характеристика

В этом случае в процессе измерения регистрируется серия следующих друг за другом перемещений, соответствующих повороту движка преобразователя на 360° . Величина перемещения определяется как число полных оборотов движка плюс неполный последний оборот, выраженные в соответствующем масштабе

Многооборотные реостатные преобразователи используются при измерении больших перемещений, для чего линейное перемещение контролируемого объекта преобразуют во вращательное реостата.

Проволочный реостатный преобразователь имеет следующий недостаток. Подвижный контакт, двигаясь вдоль обмотки, может переключать то один, то два витка переменного резистора, что приводит к неравномерности шагов выходного напряжения или переменной разрешающей способности. Поэтому при использовании проволочного потенциометра из N витков можно говорить только о среднем разрешении.

Вид функции преобразования $R_x = f(x)$ реостатного преобразователя определяется характером изменения шага намотки по длине каркаса, или профилем каркаса при равномерном шаге намотки (для упрощения

конструкции прибегают обычно к ступенчатой форме каркаса), или шунтированием участков обмотки соответствующими сопротивлениями.

В измерительной технике используют реостатные преобразователи как с линейной, так и с нелинейной функцией преобразователя. Для нелинейной функции преобразователя используются каркасы с переменной высотой (рисунок 9.4).

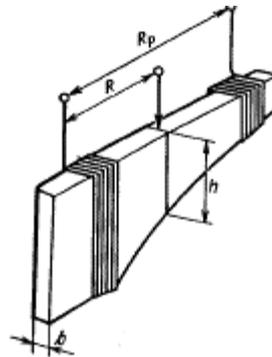


Рисунок 9.4 – Каркас реостата с переменной высотой

В них высота каркаса h плавно изменяется по рабочей длине, таким образом при движении щетки сопротивление реостата R является нелинейной функцией от рабочей длины.

Для упрощения изготовления каркаса используют кусочно-линейную аппроксимацию заданной нелинейной функции преобразователя. Каркас преобразователя получается ступенчатым. Число ступеней равно числу интервалов в кусочно-линейной аппроксимации.

9.1.2. Схема подключения

Наиболее распространенной схемой включения реостатов является дифференциальное включение в схему делителя напряжения (потенциометрическая схема), как показано на рисунке 9.5.

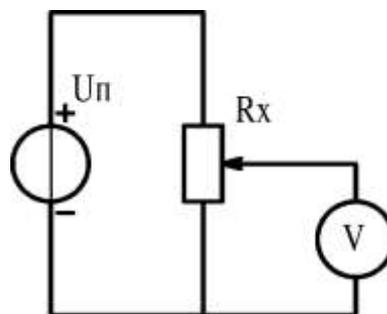


Рисунок 9.5 – Включение реостата в схему делителя напряжения

9.1.3. Материалы чувствительного элемента

В зависимости от материала чувствительного элемента реостатные преобразователи делятся на проволочные, непроволочные, фотоэлектрические, жидкостные и из проводящей керамики.

Проволочные реостатные датчики отличаются наивысшей точностью и стабильностью функции преобразования, имеют малое переходное сопротивление, низкий уровень шумов, малый ТКС. Их недостатком является низкая разрешающая способность, сравнительно невысокое сопротивление (до десятков килоом), ограниченная возможность применения на переменном токе, обусловленная остаточными индуктивностью и емкостью намотки. Указанные недостатки отсутствуют в непроволочных датчиках, однако они значительно уступают проволочным по точности.

К материалу проволоки реостатных преобразователей предъявляется ряд требований обладать стабильностью характеристик во времени, высокой коррозионной стойкостью, большой прочностью на разрыв. В реостатных преобразователях широко используют обмотки из манганина, константана, а в случаях, когда преобразователь должен работать в условиях повышенных температур, обмотки изготавливают из железо-хромовых или никелево-хромовых сплавов.

В особо ответственных случаях и при специфических условиях работы применяют сплавы на базе благородных металлов. Так, в случае, когда к реостатному преобразователю предъявляются требования высокой износостойкости, применяется, в частности, платино-иридиевый сплав (90% платины и 10% иридия). Добавка иридия к платине увеличивает ее твердость, износостойкость, химическую стойкость. Удельное сопротивление этого сплава $\rho = 0,23 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а диаметр провода может быть достаточно малым (от 0,01 мм), что позволяет изготавливать высокоомные преобразователи весьма малых габаритов.

Диаметр проволоки обычно колеблется от 0,03 до 0,3 мм. Стремление к миниатюризации приводит к использованию проволоки диаметром 0,01 мм.

Чувствительным элементом непроволочных резисторов является тонкий слой токопроводящего материала, нанесенного на изоляционный каркас. Основными видами непроволочных резисторов являются углеродистые, металлизированные (металлопленочные и металлоокисные) и композиционные. Проводящий слой последних представляет собой композицию проводящего и непроводящего материалов.

Нестабильность всех видов непроволочных резисторов лежит в пределах 1...5% в год. Исключение составляют металлопленочные резисторы, нестабильность которых не превышает 0,05...0,1% в год. ТКС большинства непроволочных резисторов равен $(3...10) \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$. Металлоокисные резисторы имеют на порядок меньший ТКС.

Отличительной особенностью непроволочных резисторов является незначительная остаточная реактивность.

9.1.4. Материалы каркаса реостатных преобразователей

Для обеспечения высокой стабильности характеристик реостатных преобразователей предъявляются определенные требования и к каркасам. Они должны сохранять свои размеры в широком температурном диапазоне, в

условиях повышенной влажности. Кроме того, каркасы должны обладать высокой теплопроводностью, что позволит увеличить удельную рассеиваемую в преобразователе мощность. Поэтому каркасы прецизионных реостатных преобразователей изготавливают из алюминиевых сплавов АМг, Д1, Д16. В преобразователях, допускающих погрешность преобразования 1% и более, они могут изготавливаться из изоляционных материалов, например, гетинакса, текстолита, стеклопластика и др.

Если требования к жесткости и точности размеров невысоки, то применяют различные неметаллические материалы: текстолит, гетинакс, эбонит, органическое стекло, прессованную керамику. Недостатки неметаллических материалов: гигроскопичность, низкая теплопроводность и теплоемкость.

9.1.5. Конструкции щеток

Конструкция контактных щеток в значительной степени определяет качество преобразователя и, в первую очередь, уровень так называемого контактного шума, генерируемого щеткой при ее движении по дорожке преобразователя. Контактный шум, возникающий в области контакта, вызывается вариациями контактного сопротивления, которые, в свою очередь, связаны с вариациями контактной площади и контактного давления, особенно при наличии на дорожке посторонних частиц. Контактный шум имеет тенденцию к росту во времени вследствие износа, загрязнения и окисления дорожки и щетки.

Контактные щетки прецизионных реостатных преобразователей выполняются в виде двух-трех проволочек диаметром 0,1...0,2 мм (несколько отличающихся одна от другой по длине), которые укреплены на щеткодержателе. Разная длина контактных проволочек обеспечивает их разные собственные частоты механических колебаний, что способствует устойчивой работе преобразователя в условиях вибраций. У менее точных преобразователей щетки делаются пластинчатыми, состоящими из одной профилированной пластины с одним или двумя надрезами, обеспечивающими различные собственные частоты вибраций отдельных ее выступов. Проволочные щетки рассчитаны на контактные усилия 0,003...0,005 Н, пластинчатые 0,05...0,1 Н. Ширина контактной поверхности щетки должна быть равной двум-трем диаметрам проволоки чувствительного элемента.

Важное значение в резистивных преобразователях имеет устойчивый контакт между токосъемным элементом движка и обмоткой, малое переходное сопротивление контакта и его стабильность. Качество контакта определяется главным образом применяемыми материалами. Материал щетки движка должен быть износоустойчивым, легко обрабатываться. При изготовлении щеток из благородных металлов приходится мириться с нестабильностью переходного сопротивления, которая вызывается перепадами температуры, влиянием примесей, содержащихся в воздухе, образованием оксидных пленок. Лучшими материалами являются благородные металлы (платина, палладий,

иридий) и их сплавы (платина-иридий, палладий-иридий). Щетка может быть выполнена из нескольких жил проволоки или пакета пластин, часто также используют стержни цилиндрической формы. Контактное давление обеспечивается гибкостью движка и колеблется для различных конструкций щеток в пределах (3–100) Н.

9.1.6. Параметры реостатных преобразователей

Конструктивный расчет реостатного преобразователя сводится обычно к определению диаметра и длины намоточного провода, а также геометрических размеров каркаса. Исходными данными, как правило, являются полное сопротивление $R_{\text{п}}$ длина намотки l , материал намоточного провода и его удельное электрическое сопротивление ρ , максимальная мощность, измерительный ток, допустимое значение погрешности.

Основными характеристиками резисторов являются: номинальное сопротивление $R_{\text{ном}}$, допустимая погрешность и допустимая временная нестабильность, которые нормируются соответствующими стандартами в зависимости от класса точности и типа резистора. Важными параметрами, характеризующими качество резисторов или определяющими условия их работы, являются номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ или предельное рабочее напряжение $U_{\text{макс}}$ температурная нестабильность или температурный коэффициент сопротивления, уровень собственных шумов.

Под номинальной мощностью резистора понимают наибольшую активную мощность, которую резистор может длительное время рассеивать при условии, что его погрешность не будет превышать значений, регламентируемых классом точности резистора.

Методическая погрешность, вызванная влиянием сопротивления нагрузки, в общем случае определяется соотношением сопротивлений преобразователя и нагрузки и в различных измерительных цепях проявляется по-разному.

Методическая погрешность реостатного преобразователя будет незначительной лишь в случае, когда сопротивление нагрузки в десятки раз превышает полное сопротивление преобразователя.

В маломощных датчиках желательно использовать высокоимпедансные потенциометры, однако при этом необходимо учитывать влияние подключаемой нагрузки. Поэтому часто на выходе таких схем приходится ставить повторители напряжений. Подвижный контакт потенциометра обычно электрически изолирован от чувствительной оси.

Температурная нестабильность, или температурный коэффициент сопротивления (ТКС) характеризует относительное изменение сопротивления, вызванное изменением температуры.

Собственные шумы резисторов складываются из тепловых и токовых. Тепловые шумы присущи всем видам резисторов. Токовые шумы возникают практически только в резисторах с зернистой структурой токопроводящего

слоя, т.е. непроволочных резисторах, и являются следствием некоторой нестабильности контактов между проводящими зернами.

Погрешность дискретности для преобразователей с равномерной намоткой (линейных преобразователей)

$$\delta_{\text{дискр}} = \frac{\Delta R_{\text{min}}}{2R_{\text{п}}} = \frac{1}{2\omega},$$

где ΔR_{min} – сопротивление одного витка преобразователя;

$R_{\text{п}}$, ω – полное сопротивление и число витков обмотки преобразователя.

Для реальных конструкций линейных реостатных преобразователей число витков составляет около 2000, а погрешность дискретности соответственно равна 0,02...0,03%. Суммарная погрешность, вызванная непостоянством электрических параметров преобразователя, достигает 0,03...0,1%. Температурная погрешность, определяемая прежде всего температурным коэффициентом сопротивления намоточного провода, не превышает обычно 0,1% на 10° С.

Временная нестабильность сопротивления резистора характеризуется относительным изменением сопротивления за определенное время (обычно за год) и определяется свойствами проводящего материала, конструкцией и, в значительной степени, технологией изготовления резистора.

Удельное сопротивление определяет размеры резистора. Поэтому с целью получения при прочих равных условиях минимальных размеров резистора удельное сопротивление материала чувствительного элемента должно быть большим. ТКС является характеристикой температурной нестабильности, следовательно, его значение должно быть ничтожно малым, а в идеальном случае равным нулю. Следует отметить, что ТКС резистора определяется главным образом ТКС материала чувствительного элемента. Однако на значении ТКС резистора сильно сказывается тензоэффект, т.е. изменение сопротивления чувствительного элемента из-за возникновения в нем механических напряжений, вызванных изменением температуры при неодинаковых температурных коэффициентах линейного расширения чувствительного элемента и каркаса. Возникающие при этом механические напряжения в проводе могут сильно сказываться и на временной нестабильности сопротивления резистора.

Подвижный контакт потенциометра обычно электрически изолирован от чувствительной оси.

Динамические свойства потенциометрических датчиков невысоки, поэтому их применяют для измерения статических или медленно меняющихся величин. Ограничение скорости изменения измеряемой величины вызвано наличием механических связей и значительных присоединенных масс в кинематических цепях датчиков, что создаст большую инерционность и снижает (при сравнительно небольшой жесткости) собственную частоту датчика до 2–10 Гц. Другим важным фактором, снижающим динамические свойства реостатных датчиков, является необходимость обеспечения

устойчивого контакта между движком и обмоткой реостатного преобразователя. При больших скоростях перемещения движка возможна потеря контакта. Это явление особенно свойственно проволочным реостатным преобразователям, контактная дорожка у которых представляет собой волнообразную поверхность. Наличие механических вибраций при работе датчика увеличивает вероятность нарушения контакта. В этом случае имеет место явление «подскока» движка, особенно на резонансных частотах.

Источники основной погрешности:

- загрязнение контактной пары щетка-провод и ее окисление;
- стирание контактной поверхности;
- гистерезис щетки преобразователя вследствие нежесткого ее крепления;
- температура внутреннего нагрева.

Источники дополнительной погрешности:

- погрешность квантования;
- влияние внешних магнитных полей на преобразователи с выходным током и напряжением, заключающееся в наведении дополнительной ЭДС в обмотке;
- влажность воздуха;
- изменение величины контактного сопротивления при изменении скорости перемещения подвижной части, которое может достигать значительных величин;
- вибрация, которую уменьшают путем выполнения волосков щетки разной длины (это приводит к различным собственным частотам колебаний).
- влияние внешней температуры на размеры и удельное сопротивление чувствительного элемента.

Суммарная погрешность, вызванная непостоянством параметров преобразователей, составляет 0,05-0,1%. Температурная погрешность обычно не превышает 0,1% на 10 градусов.

9.2. Реохордные преобразователи.

Принцип действия реохордных преобразователей аналогичен реостатным, но у них щетка скользит вдоль оси проволоки, натянутой по направлению перемещения. У этих преобразователей отсутствует погрешность дискретизации, они обладают лучшим контактом между щеткой и чувствительным элементом (проволокой), однако полное сопротивление и чувствительность у них гораздо ниже, чем у реостатов.

Реохордные преобразователи включают в измерительные цепи в виде равновесных и неравновесных мостов, делителей напряжения и т. п. в виде дополнительного сопротивления (рисунок 9.6)

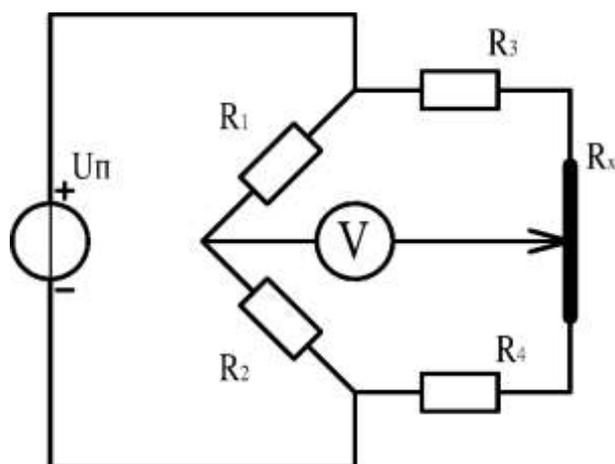


Рисунок 9.6 – Включение реохорда в мостовую схему

Реохордные преобразователи применяются при необходимости высокоточных измерений, измерений перемещений на большие расстояния и с высокими скоростями.

9.3. Индуктивные датчики

Индуктивные преобразователи – это преобразователи, в основу принципа действия которых заложена зависимость индуктивности (а следовательно и полного электрического сопротивления) намагничивающей обмотки от значения комплексного магнитного сопротивления магнитной цепи преобразователя, который, в свою очередь, является функцией длины воздушного промежутка в магнитной цепи преобразователя.

Индуктивные преобразователи широко применяются для преобразования перемещений и других механических величин, которые предварительно преобразуются в перемещение. По конструктивному выполнению эти преобразователи очень разнообразны. Основными их разновидностями являются преобразователи с переменной длиной воздушного промежутка, преобразователи с сердечником (плунжером), преобразователи с зубчатым воздушным промежутком и преобразователи с распределенными параметрами.

Для точного определения величины перемещений частота питающего генератора должна быть, по крайней мере, на порядок выше максимальной частоты движения. При медленно меняющихся процессах стабилизированный генератор можно заменить присоединением к электросети, частота которой равна 50 Гц.

Одно из основных достоинств магнитных датчиков перемещений – магнитное поле может проникать через все немагнитные материалы без потери точности определения расстояния до объекта и, следовательно, при любой преграде между датчиком и объектом: из нержавеющей стали, алюминия, латуни, меди, пластмассы, камня или дерева, расстояние между ними будет определено практически мгновенно. Другое достоинство

магнитных датчиков - они могут работать в суровых условиях окружающей среды и им не страшна коррозия, поскольку и датчики и объекты при необходимости покрывают инертными материалами, не оказывающими никакого влияния на магнитные поля.

Наиболее распространенными измерительными цепями индуктивных преобразователей являются мостовые цепи, позволяющие использовать дифференциальные преобразователи. Если катушки дифференциального преобразователя включить в два соседних плеча моста, то одинаковые изменения каких-либо параметров катушек не вызывают выходного сигнала, что позволяет исключить погрешность от влияния внешних факторов, в частности влияния изменения температуры.

9.3.1. Преобразователь с переменной длиной воздушного промежутка.

Самой простой разновидностью индуктивного преобразователя такого типа является преобразователь малых перемещений (рисунок 9.7 а, б). Этот преобразователь имеет высокую чувствительность к входной величине, незначительную чувствительность к действию внешних магнитных полей, сравнительно небольшую собственную емкость (необходимое значение индуктивности достигается, если количество витков сравнительно небольшое).

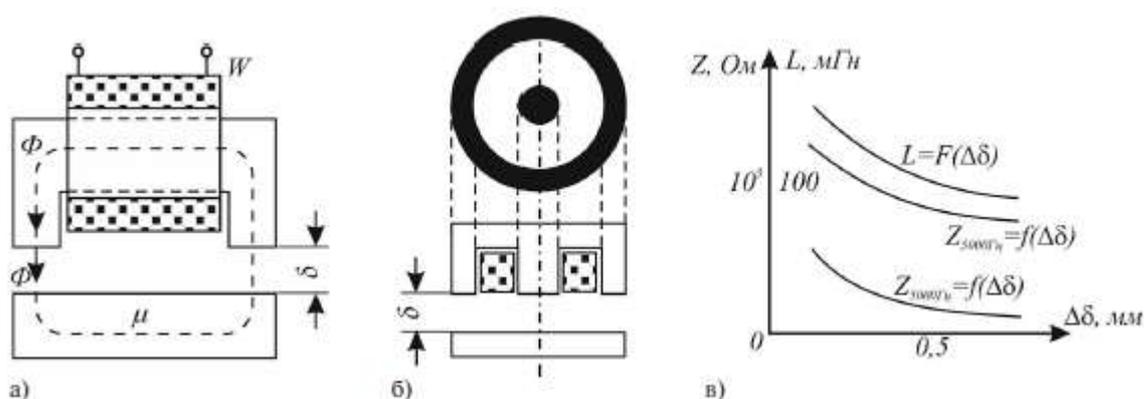


Рисунок 9.7 – Индуктивный преобразователь с переменной длиной воздушного промежутка:

а, б – конструкции, в – зависимость полного сопротивления катушки от расстояния до якоря

Информативным выходным параметром индуктивного преобразователя является полное электрическое сопротивление Z намагничивающей цепи, или эквивалентная индуктивность этой цепи, значение которой является функцией комплексного магнитного сопротивления Z_M магнитной цепи преобразователя. В качестве материалов магнитопроводов чаще всего используются электротехнические стали, пермаллой, а для частот свыше 1000 Гц – ферритовые сердечники.

При небольших относительных изменениях S , учитывая, что магнитное сопротивление магнитопровода значительно меньше магнитного

сопротивления воздушного промежутка, эквивалентная индуктивность намагничивающей обмотки

$$L \approx \frac{w^2 \times \mu_0 \times S_M}{\delta}$$

Следовательно, функция преобразования индуктивного преобразователя с переменной длиной воздушного промежутка $Z=f(\delta)$ нелинейная.

Характер изменения $Z=f(\delta)$ зависит от частоты намагничивающего тока. При низких частотах, когда индуктивное сопротивление становится близким или даже меньшим по сравнению с активным сопротивлением R обмотки, относительное изменение полного электрического сопротивления при прочих равных условиях уменьшается (рисунок в).

Индуктивный преобразователь с переменной длиной воздушного промежутка можно считать практически линейным преобразователем лишь при малых относительных изменениях длины этого промежутка $\Delta\delta/S$. В реальных конструкциях таких преобразователей при $\Delta\delta/S = 0,1 \dots 0,15$ относительное изменение индуктивности не превышает $0,05 \dots 0,1$ при нелинейности функции преобразования $1 \dots 3\%$. Поэтому такие преобразователи применяют для преобразования малых перемещений ($0,01 \dots 10$) мм.

Значительного улучшения линейности с одновременным увеличением чувствительности можно достичь, создавая дифференциальные преобразователи (рисунок 9.8).

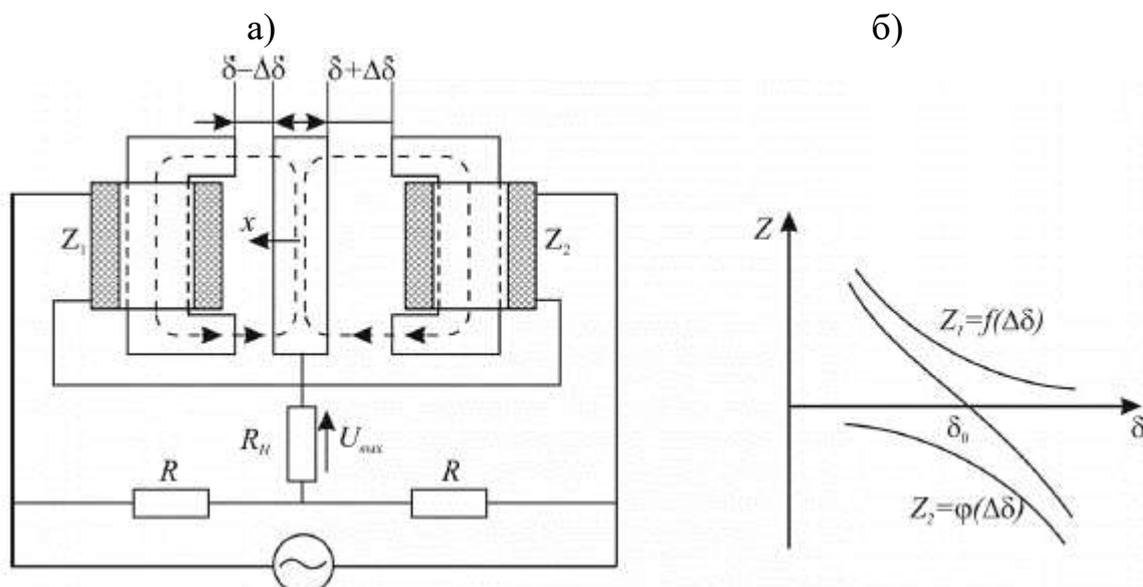


Рисунок 9.8 – Конструкция (а) и вид функции преобразования (б) дифференциального индуктивного преобразователя с переменной длиной воздушного промежутка

Дифференциальный индуктивный преобразователь (рисунок 9.8а) имеет два идентичных преобразовательных элемента, конструктивно объединенных таким образом, что при перемещении подвижного сердечника воздушный промежуток между сердечником и полюсами одного из преобразовательных элементов увеличивается, а между сердечником и полюсами другого преобразовательного элемента настолько же уменьшается. Дифференциальное включение элементов такого преобразователя дает возможность значительно расширить линейный участок функции преобразования и увеличить чувствительность (рисунок 9.8б). Относительное изменение δ дифференциальных преобразователей, в пределах которого нелинейность функции преобразования не превышает 1%, достигает $(0,3...0,4)S$. Поэтому на практике обычно применяются дифференциальные преобразователи.

9.3.2. Преобразователи плунжерного типа.

Индуктивные преобразователи этого типа с разомкнутой магнитной цепью (рисунок 9.9а) применяют для преобразования перемещений от 10 до 100 мм.

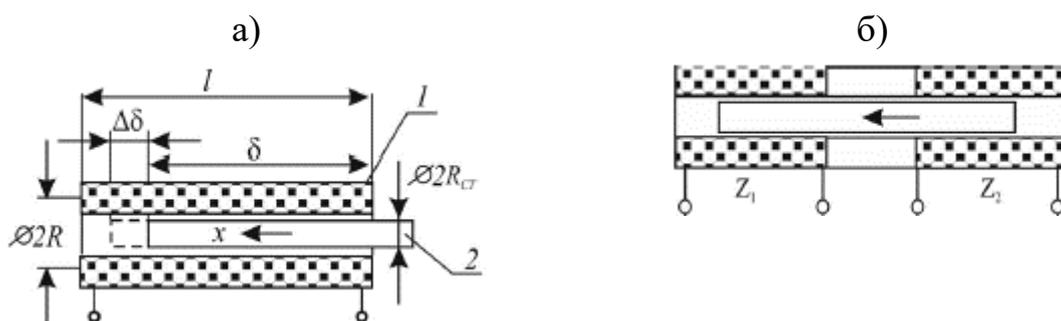


Рисунок 9.9 – Конструкция индуктивного плунжерного преобразователя:
а – одинарная; б – дифференциальная

В основу принципа действия таких преобразователей положено изменение магнитного сопротивления цепи магнитного потока, создаваемого намагничивающими обмотками во время перемещения плунжера (сердечника). Индуктивный преобразователь этого типа состоит из неподвижной катушки 1 и ферромагнитного стержня (плунжера) 2. Индуктивность катушки является функцией глубины перемещения плунжера внутрь катушки. Точное выражение функции преобразования такого преобразователя получить трудно.

Преобразователи этого типа в связи с тем, что магнитный поток замыкается в основном через воздух, имеют значительно меньшую чувствительность, чем преобразователи с переменным воздушным промежуток. Кроме того, они чувствительны к влиянию внешнего магнитного поля и нуждаются в экранировании. Эти недостатки можно устранить, если катушки разместить на ферромагнитном сердечнике.

9.3.3. Взаимоиндуктивные преобразователи

Взаимоиндуктивными (трансформаторными) называют электромагнитные преобразователи, которые имеют первичную намагничивающую обмотку и вторичную измерительную обмотку, взаимная индуктивность между которыми может изменяться под действием входной (измеряемой) величины.

На первичную подается переменное опорное напряжение, индуцирующее выходное переменное напряжение во вторичной катушке. Амплитуда выходного напряжения зависит от величины потокосцепления между 2-мя катушками.

Известны два вида взаимоиндуктивных преобразователей: с переменным магнитным сопротивлением и неподвижной обмоткой и с неизменным магнитным сопротивлением и подвижной обмоткой.

1. Перемещение объекта, изготовленного из ферромагнитного материала, внутри магнитного контура - это приводит к изменению магнитного сопротивления между катушками, что, в свою очередь, вызывает изменение потокосцепления (рисунок 9.10).

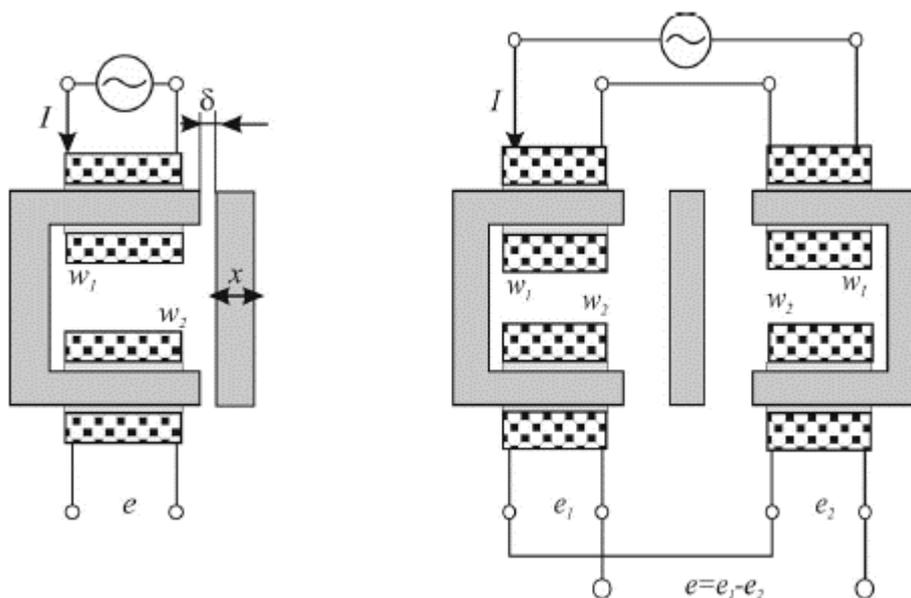


Рисунок 9.10 – Конструкции взаимоиндуктивных преобразователей:
а – одинарного; б – дифференциального;

В обычных (одинарных) взаимоиндуктивных преобразователях с переменным воздушным промежутком (рисунок 9.10а) ЭДС, которая наводится во вторичной обмотке

$$e \approx \frac{\omega \times w_1 \times w_2 \times I}{R_M + \delta / (\mu_0 \times S)}$$

где S – площадь воздушного промежутка,

R_M – магнитное сопротивление магнитопровода.

Зависимость $e=f(\delta)$ таких взаимоиндуктивных преобразователей является нелинейной. Кроме того, на выходе измерительной обмотки действует ЭДС при отсутствии входного действия, значение которого отвечает начальному зазору. Поэтому взаимоиндуктивные преобразователи с переменным воздушным зазором выполняются в большинстве случаев дифференциальными, что дает возможность при отсутствии входного действия иметь нулевой исходный сигнал, увеличить чувствительность и линейность функции преобразования. Действительно, при встречном включении вторичных обмоток дифференциального преобразователя (рисунок б) результирующая ЭДС

$$e \approx \frac{2 \times \omega \times w_1 \times w_1 \times I \times \Delta \delta}{\mu_0 \times S \times (R_M + R_\delta)^2}$$

где R_δ – магнитное сопротивление воздушного зазора

Для обеспечения неизменности суммарного сопротивления цепи намагничивающих обмоток дифференциального преобразователя обмотки w , обоих преобразовательных элементов включены последовательно. Уменьшение сопротивления одной из обмоток, вызванное перемещением подвижной сердечника, компенсируется увеличением сопротивления второй обмотки.

2. Физическое перемещение одной катушки относительно другой (рисунок 9.11).

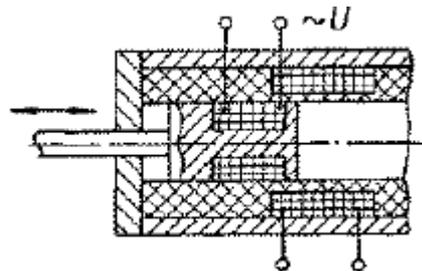


Рисунок 9.11 – Конструкция взаимоиндуктивного преобразователя с подвижной катушкой

Достоинства взаимоиндуктивных преобразователей:

- 1) датчики на их основе - бесконтактные устройства, с практически нулевыми потерями на трение,
- 2) незначительный гистерезис как магнитный, так и механический,
- 3) очень низкий выходной импеданс,
- 4) высокая помехоустойчивость,
- 5) очень высокая разрешающая способность.

9.3.4. Зубчатые преобразователи.

Преобразователи этого типа (рисунок 9.12а) нашли применение для точного измерения больших перемещений. Преобразователь содержит цилиндрический магнитопровод 1 с помещенной внутри него обмоткой 2 и якорь 3. На внутренней поверхности магнитопровода и якоре выфрезеровывают пазы, в результате чего воздушный зазор приобретает зубчатый характер.

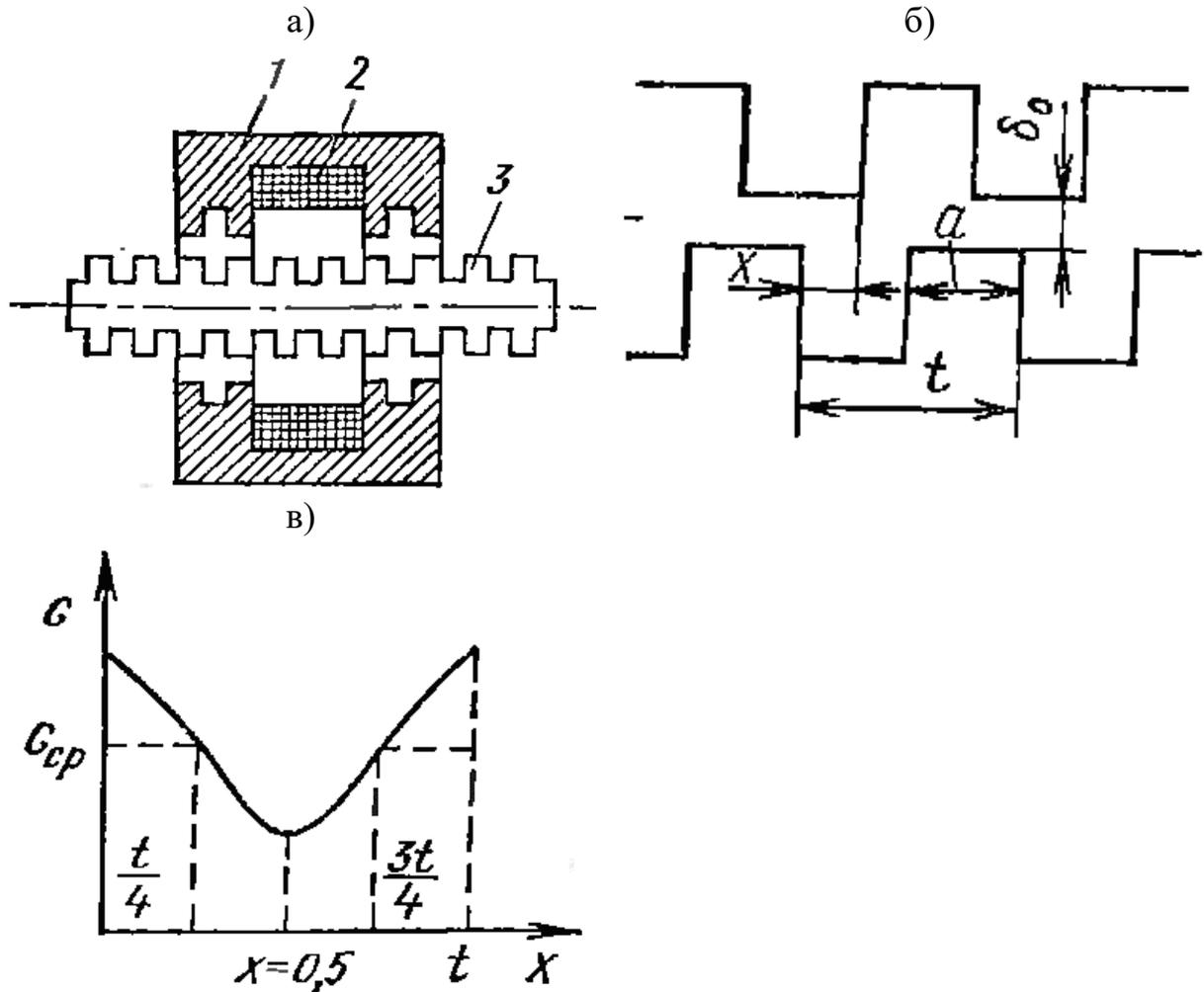


Рисунок 9.12 – Индуктивный преобразователь с зубчатым воздушным зазором:

а – конструкция; б – параметры прямоугольных зубьев; в – зависимость проводимости зубчатого зазора от величины смещения зубьев

Используемый в дифференциальной цепи зубчатый преобразователь (рисунок 9.13а) выполняют таким образом, что зубцы второй половины магнитопровода сдвинуты относительно зубцов первой половины на половину шага t .

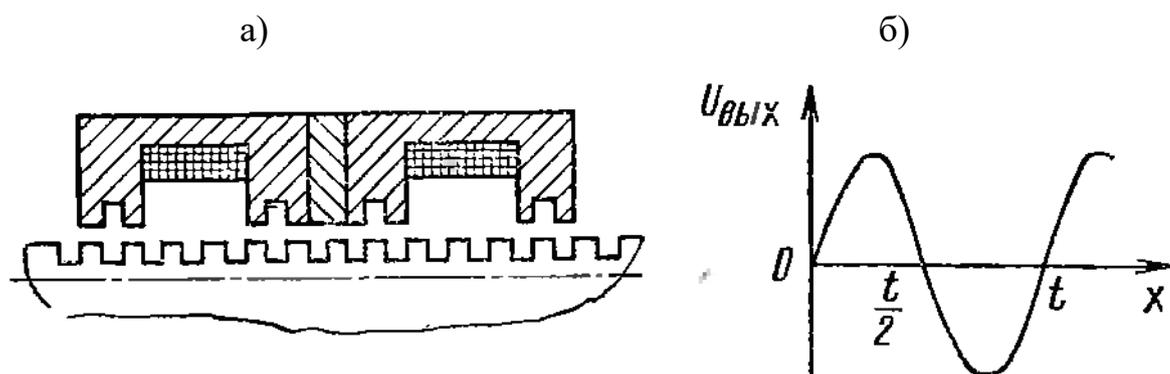


Рисунок 9.13 – Дифференциальный индуктивный преобразователь с зубчатым зазором:

а – конструкция; б – зависимость выходного напряжения от величины смещения зубьев

В этом случае при $x = t/4$ и $x = 3 \cdot t/4$ магнитные проводимости обеих половин преобразователя оказываются равными, и измерительная цепь (в случае мостового включения) будет сбалансирована. При $x = 0$ и $x = 0,5t$ разность магнитных проводимостей будет максимальной, что вызовет максимальный сигнал на выходе измерительной цепи. Если за начало отсчета принять положение $x = t/4$, то выходной сигнал измерительной цепи будет иметь вид, показанный на рисунке 9.13б. Таким образом, с точностью до половины шага зубьев перемещение якоря может быть зафиксировано по числу изменений знака выходного напряжения. При этом нестабильность выходного напряжения не влияет на точность преобразования, которая является функцией только числа зубьев статора и якоря преобразователя. Результирующую погрешность преобразователя можно было бы существенно уменьшить, если бы в качестве выходной величины использовать не только число периодов выходного сигнала, но и амплитуду, которая несет информацию о взаимном расположении паза и выступа якоря и статора внутри интервала дискретности. При этом к стабильности амплитуды также не предъявляется высоких требований. Действительно, если число зубьев якоря, например, равно 100, то погрешность дискретности составляет 0,5%. Если при этом амплитуда напряжения измеряется с погрешностью 10%, то результирующая погрешность составляет 0,05%.

Оценку амплитуды выходного напряжения удастся осуществить, используя соответствующие электронные схемы, обеспечивающие однозначную оценку перемещения, поскольку одной и той же амплитуде на интервале, равном половине шага зубьев, соответствуют два различных значения перемещения.

Для измерения угловых перемещений используют дисковые зубчатые преобразователи (рисунок 9.14 а, б), которые могут быть построены и по дифференциальной схеме.

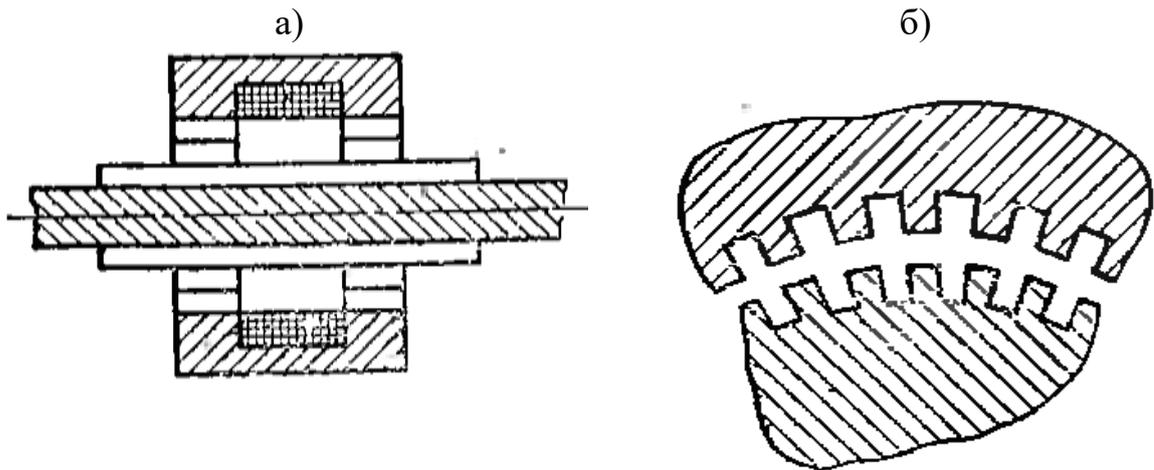


Рисунок 9.14 – Дифференциальный индуктивный преобразователь с зубчатым зазором для измерения угловых перемещений

Недостатком зубчатых преобразователей является необходимость проведения дополнительной регулировочной операции для определения начала отсчета.

9.3.5. Индуктосины.

Индуктосины представляют собой диски, на которых печатным способом выполнены радиальные обмотки (рисунок 9.15)

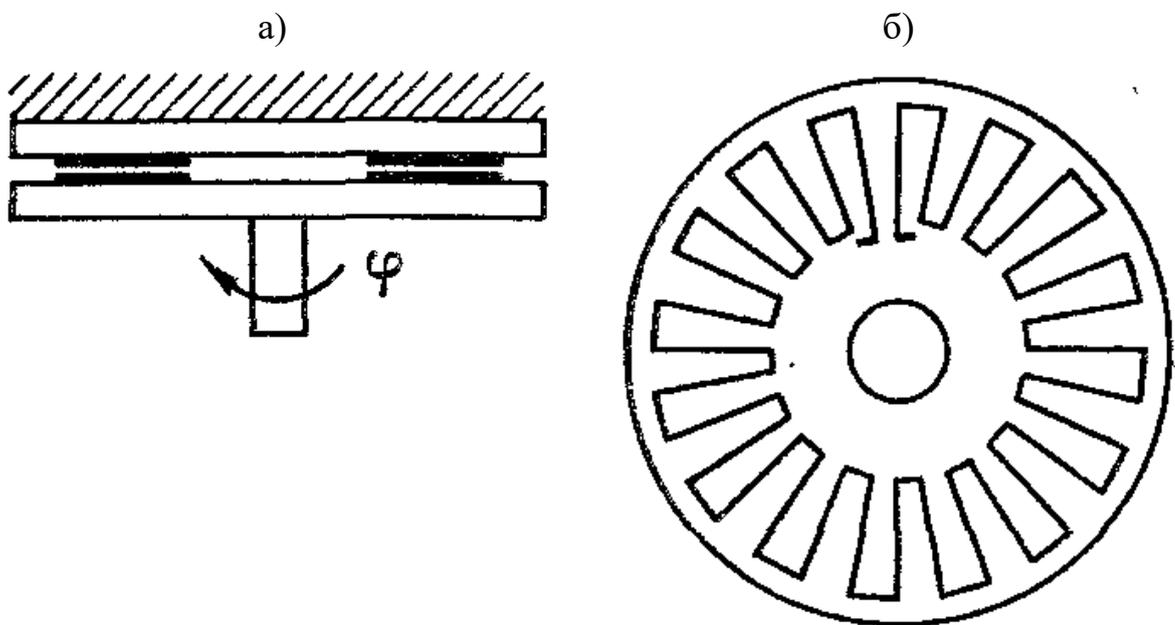


Рисунок 9.15 – Индуктосины:

а – конструкция преобразователя; б – внешний вид печатной обмотки

На обмотку неподвижного диска (статора) подается напряжение питания высокой частоты (около 10 кГц), чем индуцируется ЭДС на обмотке неподвижного диска (ротора). Максимальная ЭДС наводится в обмотке

ротора, когда ее витки находятся под витками статора, при угловом смещении ротора значение ЭДС уменьшается. При смещении ротора на угол, соответствующий шагу обмоток, фаза индуцированной ЭДС изменяется на 180° .

На роторе может быть выполнено две обмотки, включенных дифференциально, что позволяет компенсировать постоянную составляющую ЭДС, не зависящую от угла поворота.

9.3.6. Вихрековые индуктивные преобразователи

Принцип действия вихрекового преобразователя основан на изменении индуктивности и взаимной индуктивности катушек при приближении к ним проводящего тела. Глубина проникновения z электромагнитной волны в материал на низких частотах (50 Гц) для меди и алюминия составляет около 10 мм, на высоких частотах (500 кГц) глубина проникновения уменьшается до 0,1 мм. На рисунке 9.16 показано, как искажается магнитное поле катушки при приближении проводящей пластины.



Рисунок 9.16– Вид магнитного поля катушки при отсутствии (а) и наличии (б) проводящей пластины

Присутствие вблизи витка с переменным током проводящей среды приводит к изменению его первоначального поля и электрических параметров витка, т. е. его активного и реактивного сопротивления: активное сопротивление витка увеличивается за счет роста потерь в проводящей среде, а индуктивное сопротивление уменьшается.

Значение вносимых сопротивлений R и Z зависит при постоянной частоте питания и геометрических размерах обмотки от расстояния δ от обмотки до пластины, электрической проводимости и толщины пластины d , пока толщина не превышает величины $d = 2z$.

Вихрековые преобразователи находят самое широкое применение в области бесконтактного контроля линейных размеров тонких пластин и толщины покрытий (индукционная толщинометрия) и обнаружения дефектов – поверхностных царапин и трещин.

9.3.7. Преобразователи с распределенными магнитными параметрами

Для преобразования больших линейных перемещений (до 1 м и больше) применяют преобразователи с распределенными магнитными параметрами и подвижной рамкой (рисунок 9.17).

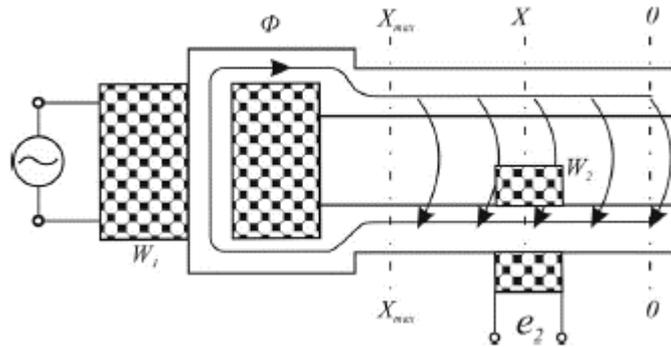


Рисунок 9.17 – Принцип действия преобразователя с подвижной обмоткой

Преобразователь состоит из магнитопровода с рабочей частью в виде двух параллельных полос, намагничивающей обмотки w_1 , и измерительной обмотки w_2 . При перемещении обмотки w_2 из крайнего левого положения в крайнее правое индуцируемая в ней ЭДС уменьшается практически по линейному закону, если магнитное сопротивление магнитопровода малое по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного промежутка. Преобразователи такого типа сравнительно легко выполнить с заданной функциональной зависимостью между индуцируемой ЭДС и преобразуемым перемещением, применив для этого профилированный магнитопровод.

Помимо приведенной конструкции применяются преобразователи с подвижным якорем.

9.4. Емкостные преобразователи

Емкостные датчики перемещений имеют широкую сферу применения, поскольку они могут измерять перемещения объектов, изготовленных практически из любых материалов.

Емкостные преобразователи представляют собой электрические конденсаторы, емкости которых меняются под действием измеряемой величины. Изменения емкости, как правило, преобразуются в переменный электрический сигнал.

В зависимости от того, какой параметр в датчике является информативным (связанным функционально с измеряемой величиной), с какой средой и в каких внешних условиях он должен работать, выбирают принципы его проектирования: принцип действия и конструктивное выполнение, материалы элементов конструкции, технологию изготовления и принципы преобразования выходного сигнала в форму, удобную для передачи и регистрации.,

Погрешности емкостных преобразователей в основном определяются влиянием температуры и влажности на геометрические размеры и диэлектрическую проницаемость среды. Уменьшить погрешность можно, используя конструкционные материалы с малым температурным коэффициентом линейного расширения, или с помощью герметизации датчиков.

Емкостные измерительные преобразователи являются практически безинерционными элементами при условии, что частота питания датчика на два порядка и более превышает частоту входного измерительного сигнала.

К достоинствам емкостных измерительных преобразователей можно отнести простоту конструкции, малые размеры и массу, высокую чувствительность, большую разрешающую способность при малом уровне входного сигнала, отсутствие подвижных токоёмных контактов, высокое быстродействие, возможность получения необходимого закона преобразования за счёт выбора соответствующих конструктивных параметров, отсутствие влияния входной цепи на измерительную.

Недостатки ёмкостных измерительных преобразователей состоят в относительно низком уровне выходной мощности сигналов, нестабильности характеристик, при изменении параметров окружающей среды, влияние паразитных ёмкостей.

9.4.1. Принцип действия

Емкость C конденсатора произвольной формы описывается функцией его конструктивных параметров и свойств среды, заполняющей пространство, охватываемое воздействием его электрического поля.

В частности, для идеализированной модели конденсатора с плоскопараллельными электродами:

$$C = \frac{\epsilon_c \times S}{\delta} = \frac{\epsilon \times \epsilon_0 \times S}{\delta}$$

где ϵ_c – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

S – площадь перекрытия электродов;

δ – расстояние между электродами.

Принцип действия емкостных преобразователей основывается на изменении геометрии конденсатора, т.е. на изменении расстояния между пластинами, площади их перекрытия, либо на размещении между пластинами различных материалов: электропроводных или диэлектрических.

Емкостные преобразователи могут быть однополярными (содержат только один конденсатор), дифференциальными (содержат 2 конденсатора) или мостовыми (содержат 4 конденсатора). В случае дифференциальных или мостовых датчиков, один или два конденсатора являются либо постоянными, либо переменными, включенными навстречу друг другу.

Емкостной измерительный преобразователь может быть представлен всего лишь одним потенциальным электродом в предположении, что другой электрод отнесен в бесконечность. В идеальном случае, если потенциальный электрод представляет собой сферу радиусом r , то емкость конденсатора будет определяться выражением:

$$C = 4 \times \pi \times \varepsilon_c \times r$$

Несмотря на большое разнообразие конструктивных разновидностей емкостных преобразователей, их можно объединить в три группы: датчики с плоскими электродами; с коаксиальными электродами и с электродами произвольной формы.

Рисунок 9.18 объясняет принцип построения емкостных преобразователей перемещения с плоскими электродами: а) преобразователей с изменяющейся площадью перекрытия электродов; б) преобразователей с изменяющимся расстоянием между электродами; в) преобразователей с изменяющейся диэлектрической проницаемостью между электродами.

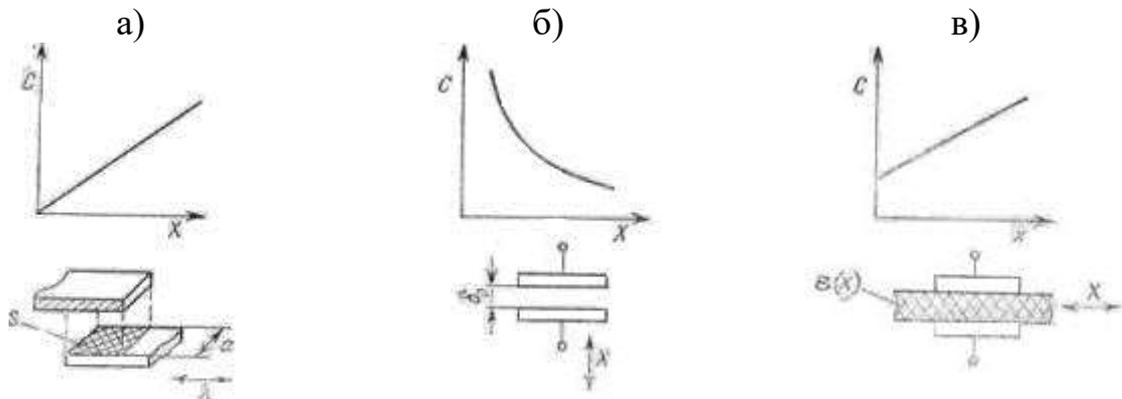


Рисунок 9.18 – Емкостные преобразователи перемещения с плоскими электродами

Емкостные преобразователи перемещения с переменной площадью перекрытия используют и для измерения угловых величин (рисунок 9.19). В этом случае емкость измерительного преобразователя

$$C = \frac{\varepsilon \times \varepsilon_0 \times (r_2^2 - r_1^2) \varphi_0 - \varphi}{2 \times \delta}$$

где r_2 и r_1 - наружный и внутренний радиусы пластин; φ_0 - начальный угол перекрытия пластин.

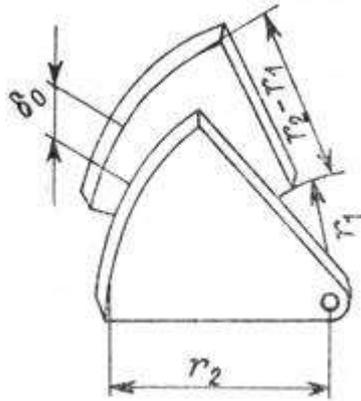


Рисунок 9.19 – Угловой емкостной преобразователь перемещения

На практике при измерении перемещения электропроводного объекта, его поверхность часто играет роль пластины конденсатора. При этом они измеряют емкость между электродом и самим объектом. Емкостные датчики также достаточно хорошо работают и с непроводящими объектами, но при этом их точность несколько ухудшается. Любой объект, попадающий в окрестность электрода, обладает своими собственными диэлектрическими свойствами, которые изменяют емкость между электродом и корпусом датчика, что, в свою очередь, приводит к появлению выходного сигнала, пропорционального расстоянию между объектом и детектором.

Для повышения чувствительности и снижения краевых эффектов в однополярном емкостном датчике применяют активное экранирование (рисунок 9.20).

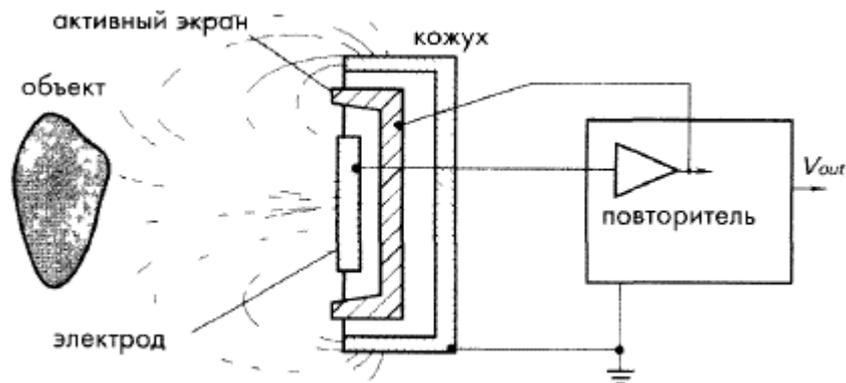


Рисунок 9.20 – Активное экранирование емкостного преобразователя

При этом экран размещается вокруг нерабочих сторон электрода и на него подается напряжение, равное напряжению на электроде. Поскольку напряжения на экране и электроде имеют одинаковые амплитуды и фазы, между ними нет электрического поля, и все компоненты, расположенные за экраном не оказывают никакого влияния на работу датчика.

9.4.2. Дифференциальные преобразователи

В примере, показанном на рисунке 9.21, рассматриваются три пластины одинаковой площади.

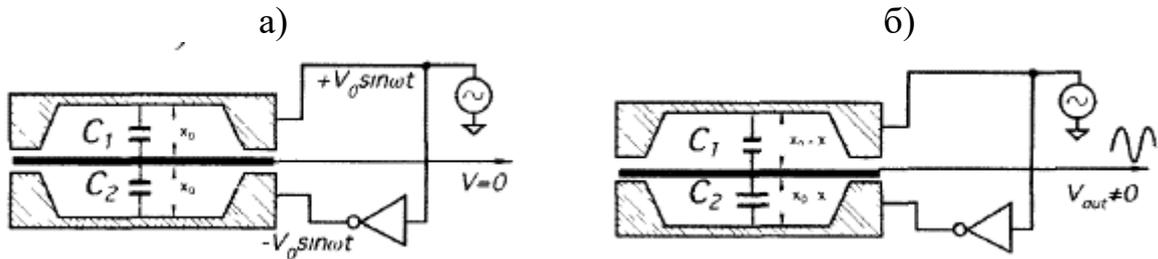


Рисунок 9.21 – Схема дифференциального емкостного преобразователя перемещения

Эти пластины формируют два конденсатора C_1 и C_2 . На две крайние пластины подаются синусоидальные сигналы одинаковой амплитуды, но с разностью фаз, равной 180° . Поскольку оба конденсатора являются одинаковыми, токи через них взаимно уничтожают друг друга, и потенциал центральной пластины практически равен нулю. Теперь рассмотрим ситуацию, когда центральная пластина сместилась вниз на расстояние x (рисунок 9.21б). Это приведет к изменению емкостей конденсаторов C_1 и C_2 :

$$C_1 = \frac{\varepsilon A}{x_0 + x}, C_2 = \frac{\varepsilon A}{x_0 - x}.$$

При этом амплитуда сигнала на центральной пластине будет пропорциональна величине перемещения x , а фаза - направлению движения. Амплитуду выходного сигнала можно найти из выражения:

$$V_{out} = V_0 \left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C} \right).$$

При выполнении условия $x \ll x_0$, выходное напряжение практически линейно зависит от перемещения. Второй член суммы соответствует исходному рассогласованию двух конденсаторов и является основной причиной возникновения напряжения смещения выходного сигнала. Краевые

9.4.3. Мостовые преобразователи

На рисунке 9.22 показан линейный мостовой емкостной преобразователь перемещений, состоящий из двух групп плоских электродов, расположенных параллельно на фиксированном расстоянии d .

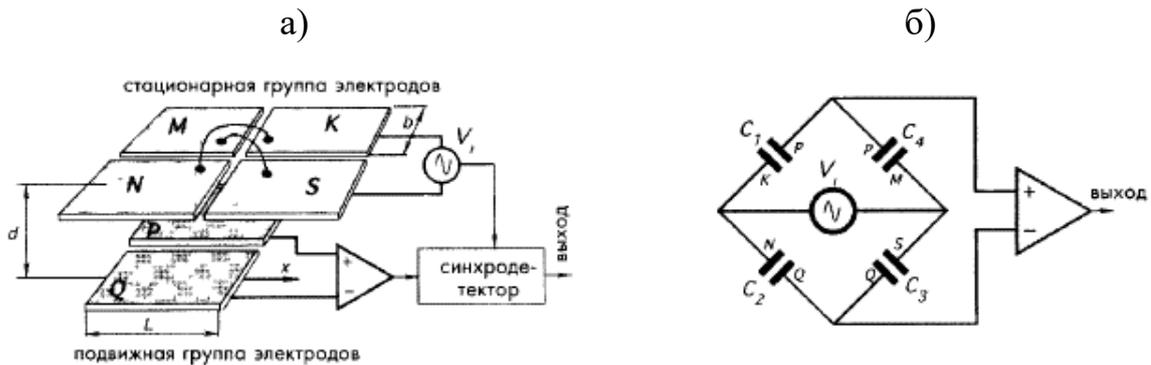


Рисунок 9.22 – Конструкция (а) и схема подключения (б) мостового емкостного преобразователя перемещения

Для увеличения емкости расстояние между электродами делается достаточно маленьким. Стационарная группа электродов состоит из четырех прямоугольных элементов, а подвижная группа - из двух. Все шесть элементов имеют одинаковые размеры (размер боковой стороны равен b). Для увеличения диапазона линейности желательно делать размер каждого элемента, как можно, большим (здесь, как правило, начинают сказываться ограничения по механической прочности). Четыре электрода стационарной группы перекрестно соединены друг с другом электрическими проводами, что делается для формирования емкостной схемы мостового типа.

Емкость конденсатора, сформированного двумя параллельными пластинами, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга, пропорциональна площади части подвижной пластины, расположенной напротив соответствующей области стационарной пластины. На рисунке б показана эквивалентная схема датчика перемещений с конфигурацией емкостного моста. Величина конденсатора C , определяется выражением:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 b}{d} \left(\frac{L}{2} + x \right).$$

Остальные значения емкостей вычисляются по аналогичным уравнениям. Отметим, что емкости конденсаторов, расположенных напротив друг друга, приблизительно равны между собой: $C_1 = C_3$ а $C_2 = C_4$. Нарушение симметричности расположения пластин приводит к разбалансу моста и появлению сигнала на выходе дифференциального усилителя. Емкостная мостовая схема обладает всеми достоинствами, присущими любой мостовой схеме: линейностью и высокой помехозащищенностью. Подобные датчики могут быть реализованы не только с плоскими электродами. Такой метод построения датчиков применим к любым симметричным конфигурациям (например, для построения детекторов вращательного движения).

9.4.4. Измерительные схемы емкостных преобразователей

Существует несколько типичных методов измерения емкости.

1. Прямой метод подразумевает заряд конденсатора от источника тока в течение определенного времени и затем измерение напряжения на конденсаторе. Этот метод требует наличия прецизионного источника очень маленького тока и высокоимпедансного входа измерителя напряжения.

2. Измерения импеданса конденсатора на переменном токе. Источник синусоидального сигнала подключается к конденсатору и при этом измеряются напряжение и (или) ток через конденсатор.

Практической реализацией данного метода являются схемы делителя напряжения и мостовая.

3. Использование измеряемой емкости в качестве времязадающей в RC-генераторе с последующим измерением постоянной времени, частоты или периода. Этот метод прост, но обычно не обеспечивает высокой точности.

4. Применение специальной микросхемы – зарядового усилителя, который преобразует соотношение измеряемой и опорной емкостей в сигнал напряжения.

9.5. Гравитационные преобразователи

Для точного определения угловых перемещений, помимо реостатных, индуктивных и емкостных преобразователей применяются более сложные устройства.

9.5.1. Ртутные преобразователи

Данная конструкция (рисунок 9.23) состоит из продолговатой колбы, помещенной в нее капли ртути и контактов, установленных с одной стороны.

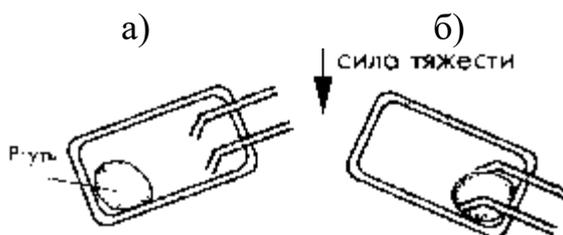


Рисунок 9.23 – Конструкция ртутного преобразователя

При одном угле наклона капля ртути находится в противоположном от контактов конце колбы (рисунок а), при его изменении, капля перетекает к другому концу, замыкая контакты.

Помимо ртути могут использоваться металлические шарики.

9.5.2. Электролитический преобразователь

Электролитический преобразователь наклона (рисунок 9.24) состоит из небольшой, слегка изогнутой стеклянной трубки, частично заполненной электролитом, в которой размещены 3 электрода: 2 - на концах, а 1 - по центру.

Находящийся внутри трубки воздушный пузырь перемещается вдоль нее при ее наклоне в ту или другую сторону.

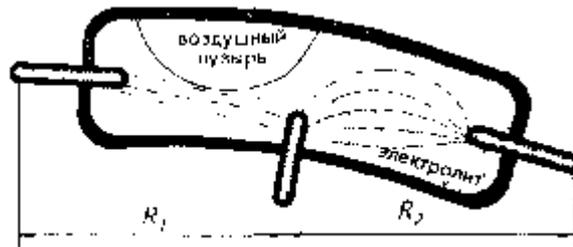


Рисунок 9.24 – Конструкция электролитического преобразователя угла наклона

В зависимости от расположения пузыря меняются электрические сопротивления между центральным и боковыми электродами. Как только положение трубки перестает быть горизонтальным, пропорционально ее углу наклона меняются и значения сопротивлений. Электроды включаются в мостовую схему, питаемую переменным током.

Электролитические датчики наклона выпускаются несколькими кампаниями для измерения широкого диапазона углов: $\pm 1^\circ \dots \pm 80^\circ$. В зависимости от измеряемого диапазона меняется и степень изогнутости стеклянных трубок.

9.5.3. Преобразователи с фотодиодной матрицей

Еще более точными устройствами для измерения углов наклона являются преобразователи с фотодиодной матрицей (оптоэлектронные). Они применяются в строительстве и на механических производствах для определения с высоким разрешением формы сложных объектов (рисунок 9.25).

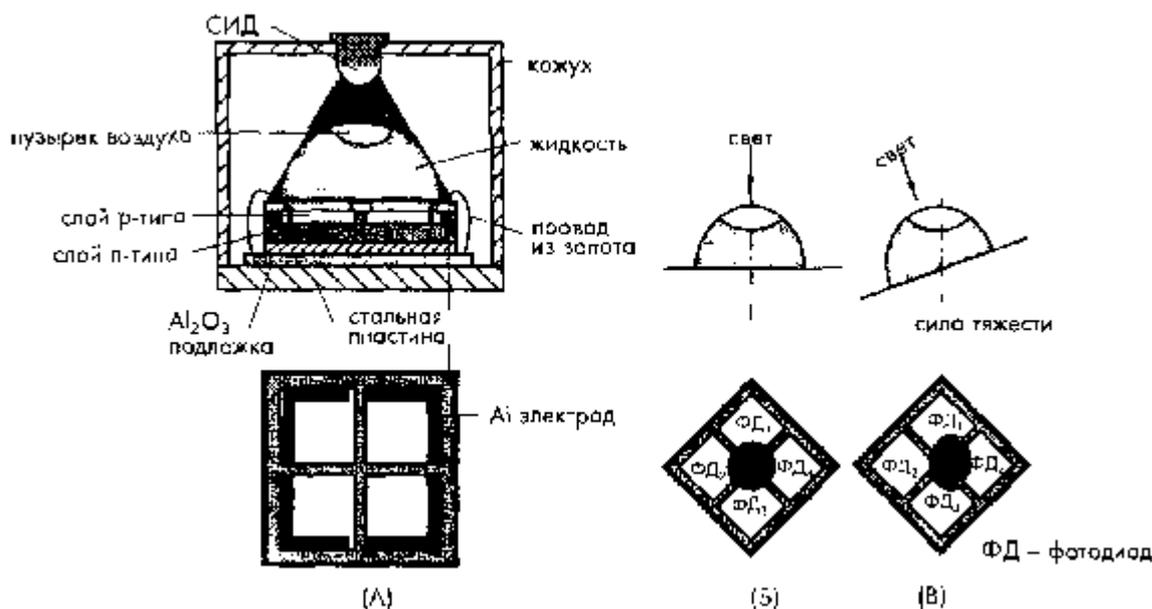


Рисунок 9.25 – Оптоэлектронные датчики наклона: А - конструкция, Б - тень от пузырька воздуха при горизонтальном положении датчика, В - тень от пузырька при его наклонном положении

Оптоэлектронный датчик наклона (рисунок) состоит из светоизлучающего диода (СИД) и спиртового нивелира в форме полусферы, смонтированного на фотодиодной матрице. Тень пузырька воздуха в жидкости нивелира проецируется на поверхность фотодиодной матрицы. Если датчик находится в строго горизонтальном положении, тень от пузырька является круглой (рисунок б), и площади участков тени, попадающих на разные фотодиоды матрицы, будут равны. При наклоне датчика тень от пузырька принимает вид смещенного от центра эллипса (рисунок в), очевидно, что при этом токи на выходах каждого фотодиода будут разными.

9.6. Оптические преобразователи

Их принцип работы основан на наблюдении или регистрации параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом. По характеру взаимодействия различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного и индуцированного излучения. Последним термином определяют оптическое излучение объекта под действием внешнего воздействия, например, люминесценцию. Первичными информативными параметрами являются амплитуда, фаза, степень поляризации, частота или частотный спектр, время прохождения света через объект, геометрия преломления и отражения лучей.

Оптические методы имеют широкое применение благодаря большому разнообразию способов получения первичной информации. Возможность их применения для наружного контроля не зависит от материала объекта.

9.6.1. Отражающий преобразователь

В такой разновидности преобразователя определяется интенсивность света, отраженного от контролируемого объекта.

На рисунке 9.26 показан датчик перемещений, в котором через оптоволоконный волновод перелается свет в сторону отражающей поверхности.

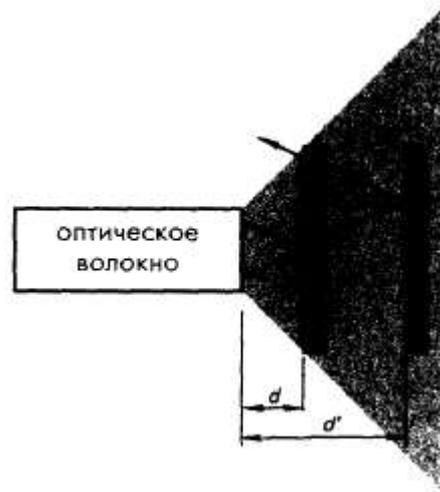


Рисунок 9.26 – Принцип действия отражающего преобразователя

Свет проходит вдоль волокна и выходит в форме конуса, направленного к отражателю. Чем ближе отражающая поверхность расположена к концу волокна, тем больше фотонов света возвращается назад в детектор, что означает более высокую интенсивность отраженного излучения. Таким образом, по величине этой интенсивности можно судить о перемещении отражающего объекта. Благодаря коническому профилю испускаемого света в ограниченном пространстве удастся получить квазилинейную зависимость между интенсивностью возвращенного излучения и расстоянием между концом волокна и отражателем.

9.6.2. Решетчатые преобразователи

Оптический датчик перемещения может быть изготовлен на основе двух перекрывающихся решеток, играющих роль модулятора интенсивности света (рисунок 9.27).

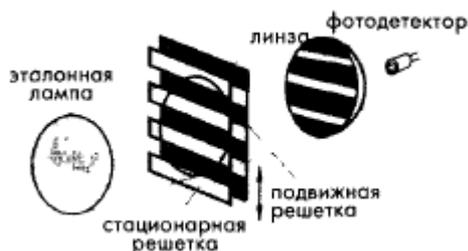


Рисунок 9.27 – Конструкция решетчатого оптического преобразователя

Излучение от эталонной лампы сначала попадает на первую стационарную решетку, которая пропускает на вторую подвижную решетку только 50% света. Когда непрозрачные полосы подвижной решетки точно совмещаются с пропускающими зонами стационарной решетки, путь свету будет полностью перекрыт. Следовательно, такая комбинация решеток позволяет модулировать интенсивность выходящего пучка света от 0 до 50% интенсивности эталонной лампы. Прошедший через решетки свет фокусируется на чувствительную поверхность фотодетектора, который преобразует его в электрический ток.

Максимальное измеряемое перемещение определяется размерами непрозрачного и прозрачного секторов решеток. Всегда необходимо выбирать компромисс между динамическим диапазоном модулятора и его чувствительностью, поскольку чем больше шаг решетки (больше размеры прозрачных и непрозрачных секторов), тем ниже чувствительность, но шире интервал измерений. Для повышения чувствительности желательно делать шаг решетки, как можно, меньше, чтобы самые незначительные перемещения решетки приводили к существенному изменению выходного сигнала. Этот тип модулятора используется в гидрофонах для определения перемещений диафрагмы. При шаге решетки 10 мкм максимальное измеряемое перемещение составляет 5 мкм.

9.6.3. Поляризационный преобразователь приближения

Использование поляризованного света позволяет улучшить характеристики оптоэлектронных датчиков. Каждый фотон света обладает индивидуальными направлениями магнитного и электрического полей, перпендикулярных друг другу и направлению распространения излучения. Направление электрического поля совпадает с направлением поляризации света. Большинство источников света испускают фотоны, имеющие произвольную поляризацию. Для поляризации света его направляют на поляризационный фильтр, изготовленный из специального материала, пропускающего фотоны только одного направления поляризации, остальные фотоны при этом либо поглощаются, либо отражаются. Однако любое направление поляризации можно представить в виде геометрической суммы двух ортогональных составляющих. Одна из этих составляющих совпадает с направлением поляризации фильтра. Тогда, поворачивая источник света,

можно постепенно изменять интенсивность света на выходе фильтра (рисунок 9.28).

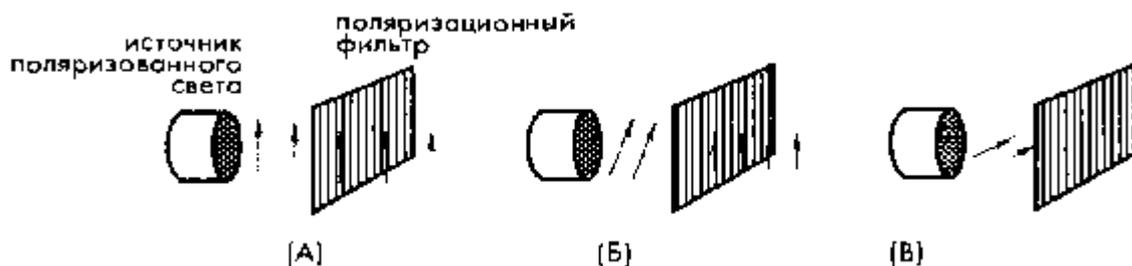


Рисунок 9.28 – Принцип действия поляризационных преобразователей

После встречи поляризованного света с объектом отраженные лучи могут либо сохранить направление поляризации (зеркальное отражение), либо изменить угол поляризации (характерно для многих неметаллических объектов). Таким образом датчик, реагирующий на отражающие объекты должен содержать 2 перпендикулярно направленных поляризационных фильтра: один рядом с источником света, а другой рядом с фотоприемником (рисунок 9.29).

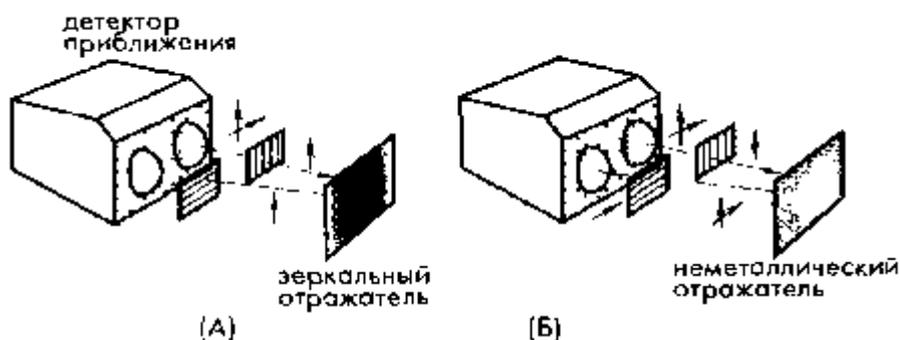


Рисунок 9.29 – Детектор приближения с двумя поляризационными фильтрами, расположенными под углом 90° друг к другу А - поляризованный свет отражается от металлического объекта, не меняя направление поляризации, Б - неметаллический объект меняет направление поляризации отраженного света, что позволяет ему пройти через поляризационный фильтр

Первый фильтр располагается рядом с излучающей линзой и служит для поляризации лучей от источника света, а второй - рядом с принимающей линзой датчика, пропускает только компоненты излучений, направленные под углом 90° к испускаемому свету.

Если свет отражается от зеркальных рефлекторов, направление его поляризации не меняется и, следовательно, принимающий фильтр ничего не пропустит на фотодетектор. Однако, если происходит незеркальное отражение от объекта, часть фотонов, имеющих соответствующее направление поляризации, достигнет фотодетектор. Следовательно, использование

выходных поляризационных фильтров позволяет снизить ложные срабатывания при детектировании неметаллических объектов.

9.6.4. Преобразователи с интерферометром Фабри-Перо

Для прецизионного измерения малых перемещений в неблагоприятных условиях окружающей среды применяются, так называемые, оптические резонаторы Фабри-Перо, состоящие из 2-х полупрозрачных зеркал, расположенных напротив друг друга на расстоянии L (рисунок 9.30).

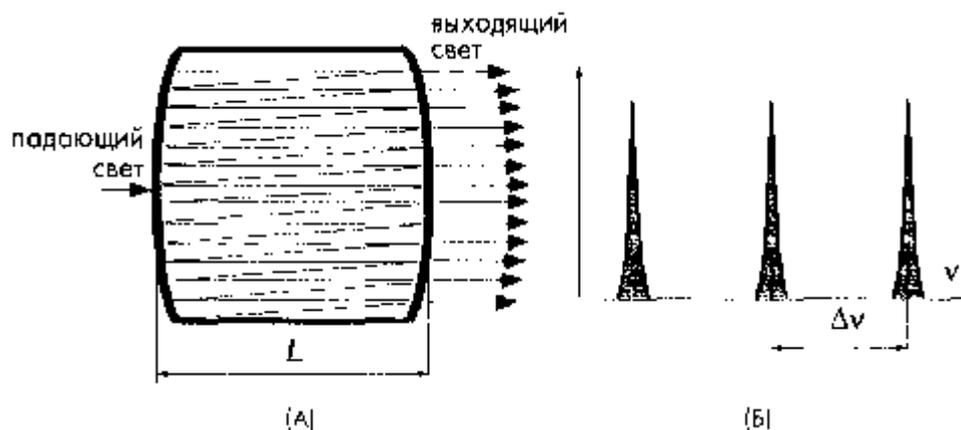


Рисунок 9.30 – Принцип действия преобразователя на резонаторе Фабри-Перо:

- а – многократная интерференция внутри резонатора Фабри-Перо,
- б – спектр излучения из резонатора

Свет в резонатор поступает от источника с известными характеристиками, например, от лазера. Фотоны, попадая в резонатор, начинают отражаться то от одного, то от другого зеркала. В процессе этих отражений они интерферируют друг с другом. Фактически, резонатор играет роль светового накопителя. За пределы резонатора могут выйти фотоны только определенных частот.

Таким образом, можно считать, что интерферометр Фабри-Перо является частотным фильтром, частота пропускания которого определяется длиной резонатора (рисунок б). Выходящий из резонатора свет имеет форму последовательных импульсов и при изменении длины резонатора соответственно меняются и частота выходящего света.

Если сделать одно из зеркал подвижным, то, измеряя выходящую частоту импульсов света, можно определять очень небольшие изменения длины резонатора.

Для используемых на практике резонаторов расстояние между зеркалами составляет порядка 1 мкм. Объектом измерения может быть любая физическая величина, изменение которой приводит к изменению размеров резонатора (перемещению зеркал): например, механическое напряжение, сила, давление и температура.

Благодаря своей универсальности, датчики Фабри-Перо получили широкое распространение и детектируют изменения длины оптического пути, вызванные изменениями коэффициента преломления, либо изменением физической длины резонатора. Датчики Фабри-Перо, изготовленные при помощи MEMS технологий, обладают миниатюрными размерами и низкой стоимостью. Другое достоинство микродатчиков Фабри-Перо – для генерации интерференционного сигнала им подходят практически любые когерентные источники света, даже такие как СИД.

Преимущества данного метода: линейность; нечувствительность к интенсивности излучения источника света и излучения, возникающего при передаче сигналов по световодам; универсальность, т.е. возможность измерения различных внешних воздействий одним и тем же инструментом; широкий динамический диапазон (1:15000) и высокая разрешающая способность. Кроме того, волоконооптические датчики устойчивы ко многим видам электромагнитных и радиочастотных помех и могут работать в суровых условиях окружающей среды, например, в СВЧ-печах.

9.6.5. Позиционно-чувствительные преобразователи

Такой преобразователь содержит светоизлучающий диод и позиционно-чувствительный фотодетектор (например, матрицу фотоприемников). Принцип его действия основан на геометрических свойствах треугольников (рисунок 9.31).

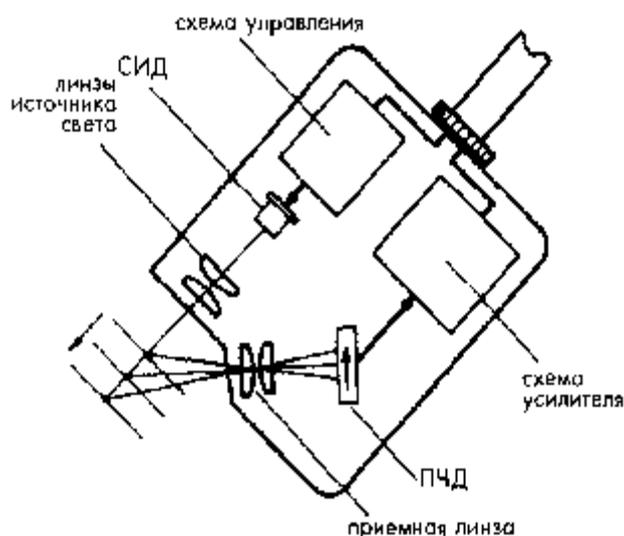


Рисунок 9.31 – Схема оптического датчика на основе позиционно-чувствительного фотодетектора

Излучение от светодиода, работающего в ближней ИК области, проходя через линзу коллиматора, формирует луч с малым углом отклонения (менее 2°). Луч является импульсным с малой длительностью (порядка 0.7 мс). Отражаясь от объекта лучи возвращаются назад в датчик. Полученное излучение (низкой интенсивности) фокусируется на чувствительной

поверхности фотодетектора. При изменении расстояния до контролируемого объекта будет изменяться точка фокусировки лучей на фотодетекторе.

Основным достоинством таких преобразователей датчиков является их точность.

9.7. Дальномеры

Для проведения бесконтактных измерений можно разработать активный датчик, который бы мог одновременно и передавать эталонный сигнал, и принимать отраженный от объекта сигнал. Передаваться энергия может в виде любого излучения - например, через электромагнитные волны оптического (как в ПЧД) или микроволнового диапазонов, через акустические волны и т.д.

9.7.1. Ультразвуковые дальномеры

Принцип передачи и приема ультразвуковой энергии лежит в основе очень популярных ультразвуковых датчиков и детекторов скорости. Ультразвуковые волны являются механическими акустическими волнами, частота которых лежит за пределами слышимости человеческого уха – более 20 кГц.

При столкновении любых волн с объектом часть их энергии отражается. В случае ультразвуковых волн отраженная энергия рассеивается в пространстве. Это означает, что вне зависимости от направления падающего луча, все отраженные лучи почти равномерно распределяются внутри широкого пространственного угла, который может достигать значения 180°.

Расстояние L_0 до объекта можно определить по скорости ультразвуковых волн v в данной среде и углу θ (рисунок 9.32):

$$L_0 = \frac{vt \cos \theta}{2},$$

где t - время, за которое ультразвуковая волна распространяется от излучателя до объекта и назад к приемнику.

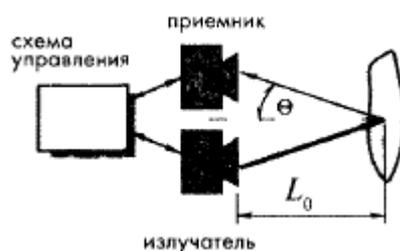


Рисунок 9.32 – Расчетная схема определения расстояния

Если излучатель и приемник расположены недалеко друг от друга по сравнению с расстоянием до объекта, то можно считать $\cos(\theta) = 1$. Очевидное преимущество ультразвуковых волн над волнами микроволнового диапазона заключается в том, что они распространяются со скоростями, которые намного меньше скорости света, характерной для СВЧ-волн. Поэтому интервал t для

них гораздо длиннее, что упрощает его измерение, и, следовательно, снижает стоимость устройств.

9.7.2. Лазерные импульсные дальномеры

Принцип действия лазерных импульсных дальномеров основан на измерении интервала времени между моментом излучения зондирующего лазерного импульса и моментом приема излучения, отраженного от объекта. Источником излучения в таких приборах является импульсный лазер (обычно твердотельный или полупроводниковый), излучение которого коллимируется с помощью оптической формирующей системы. При формировании лазерного импульса часть лазерного излучения отводится (например, с помощью светоделителя) на первое фотоприемное устройство, по сигналу с которого начинает работать секундомер. Отраженное от объекта излучение попадает во второе фотоприемное устройство, после чего счет времени останавливается.

При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды (атмосфере, космосе, воде) дальность до объекта можно рассчитать с помощью следующего выражения (при этом учитывается, что лазерное излучение проходит двойное расстояние):

$$L = \frac{c \times \Delta t}{2 \times n}$$

где c – скорость света в вакууме; Δt – отмеренный интервал времени; n – показатель преломления среды распространения для используемой среды распространения лазерного излучения.

9.7.3. Лазерные фазовые дальномеры

Лазерные фазовые дальномеры в отличие от рассмотренных выше импульсных дальномеров обладают существенно меньшей дальностью измерения, но при этом гораздо большей точностью измерений. Такие различия объясняются тем, что в качестве источника излучения в лазерных фазовых дальномерах используется непрерывный полупроводниковый лазер либо светодиод, излучение которых промодулировано одним или несколькими гармоническими сигналами.

В лазерных фазовых дальномерах расстояние определяется сравнением фазы модулирующего сигнала на выходе с приемника излучения (фаза излучения, прошедшего расстояние до объекта и обратно) с фазой опорного сигнала (фаза сигнала на источнике излучения).

9.8. Магнитострикционные преобразователи

Для измерения больших перемещений с высоким разрешением часто применяются магнитострикционные преобразователи. Магнитострикционный преобразователь состоит из 2-х основных частей: длинного волновода (до 18 м) и постоянного кольцевого магнита (рисунок 9.33).

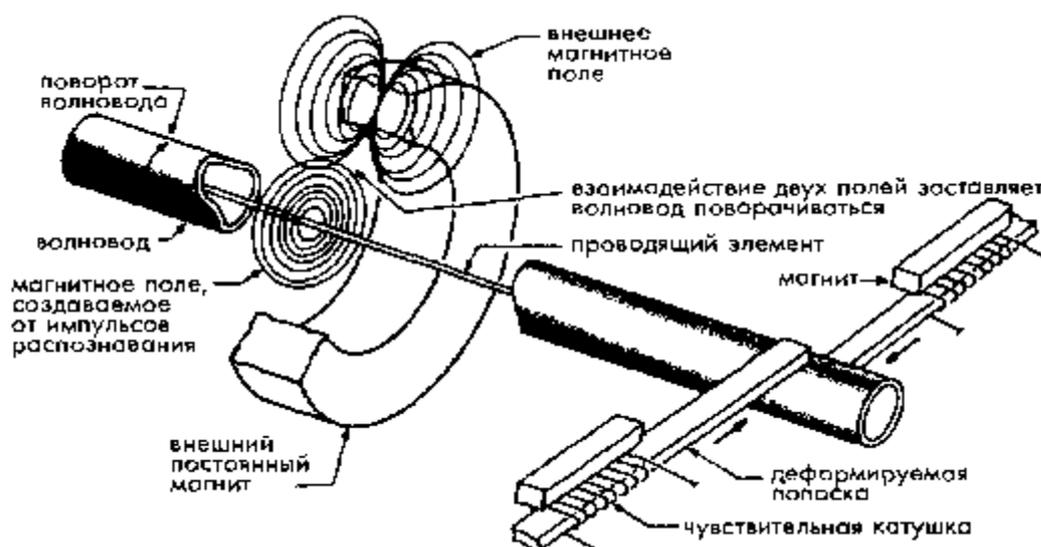


Рисунок 9.33 – Магнестрикционный датчик, использующий УЗ волны для определения положения постоянного магнита

Магнит может свободно перемещаться вдоль волновода, не касаясь его. Положение магнита над той или иной точкой волновода и является измеряемым сигналом, который датчик преобразует в электрический сигнал. Внутри волновода проходит проводник, который при подаче на него электрических импульсов создает магнитное поле вдоль всей его длины. Другое магнитное поле, образованное постоянным магнитом, существует только вблизи него. Поэтому 2 поля складываются только там, где находится постоянный магнит. Результирующее поле - векторная сумма напряженностей 2-х полей. Это поле создает крутящий момент, заставляющий волновод поворачиваться в месте расположения магнита. Это явление известно под названием эффекта Вайдемана.

Таким образом, электрические импульсы, подаваемые в коаксиальный проводник волновода, приводят к появлению механических импульсов кручения, распространяющихся вдоль волновода со скоростью звука, соответствующей его материалу. Момент прихода импульсов на головку датчика необходимо точно определять. Один из способов преобразования импульсов заключается в преобразовании УЗ импульсов в выходные электрические сигналы. Это можно выполнить при помощи пьезоэлектрических датчиков или, как показано на рисунке, при помощи датчика магнитного сопротивления, который состоит из 2-х катушек, расположенных рядом с небольшими постоянными магнитами. Катушки механически связаны с волноводом, поэтому и реагируют на импульсы, возникающие в нем, в такт с которыми они вырабатывают короткие электрические импульсы. Временная задержка между этими импульсами и соответствующими импульсами возбуждения, подаваемыми на проводник волновода, является точной мерой положения кольцевого магнита. Эта временная задержка при помощи соответствующей электронной схемы преобразуется в цифровой код. Достоинства такого преобразователя:

линейность (порядка 0.05% от полной шкалы измерений), хорошая воспроизводимость (порядка 3 мкм) и долговременная стабильность. Он может работать в агрессивных средах, при высоких давлениях и температурах, а также при сильной радиации.

У магнитоэлектрического преобразователя есть еще одно достоинство: низкая температурная чувствительность, которая может составлять порядка $20 \cdot 10^{-6}$ на $^{\circ}\text{C}$. Такие датчики используются в гидравлических цилиндрах, в прессовальных машинах (для измерения линейных перемещений прессы), в горном деле (для обнаружения подвижки скал), вращающихся мельницах, кузницах, лифтах и в других устройствах, где требуется высокая разрешающая способность при измерении больших перемещений.

9.9. Датчики Холла

Если через относительно длинную пластину, выполненную из полупроводника, например, с n-проводностью, помещенную в магнитное поле (рисунок 9.34), пропустить в направлении оси X электрический ток I, то на каждый электрон, который движется внутри пластины, действует сила Лоренца. Если вектор индукции B нормален к плоскости пластины, то есть направленный вдоль оси Z, сила Лоренца равняется

$$F_l = e_0 \times v \times B$$

где e_0 – заряд электрона; v – средняя скорость движения носителей заряда в направлении линии тока

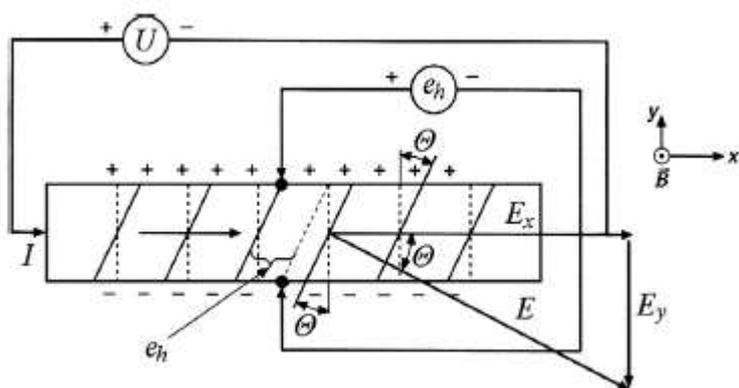


Рисунок 9.34 – Схема действия эффекта Холла

Гальваномагнитные эффекты сильнее всего выражены в полупроводниках только с электронной или только дырочной проводимостью (германий, кремний, висмут, арсенид индия, арсенид галлия, селенид ртути, арсенид кадмия и другие), из которых и изготавливаются гальваномагнитные преобразователи.

Под действием этой силы электроны будут отклоняться к одной из продольных граней пластины, в результате чего их концентрация увеличится, а на противоположной грани – уменьшится. Это приведет к пространственному распределению зарядов и к появлению некоторой разницы

потенциалов между гранями и, соответственно, к возникновению поперечной составляющей напряженности E_v электрического поля, которое называется напряженностью Холла. В результате на электрон начинает действовать, кроме силы Лоренца F_x , сила электрического взаимодействия.

Значение ЭДС Холла будет равным

$$e_h = E_v \times b = \frac{I \times B}{e_0 \times n \times d} = \frac{R_h}{d} \times I \times B$$

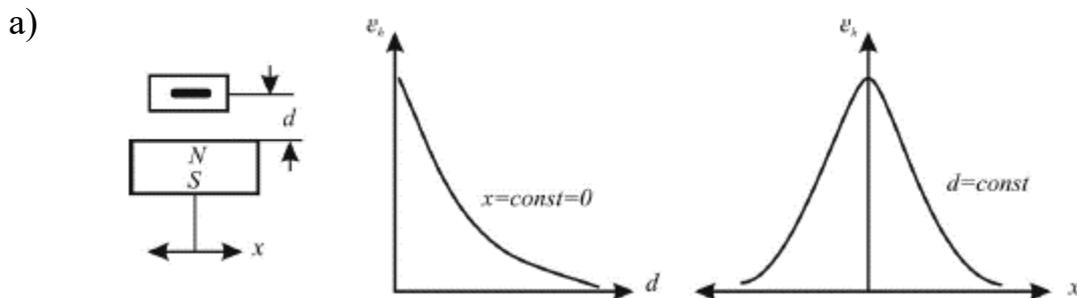
где R_h – коэффициент Холла, который зависит от природы материала чувствительного элемента; b и d – сечение пластины; n – концентрация электронов.

Теоретически функция преобразования, то есть зависимость ЭДС Холла от индукции при заданном $I = \text{const}$, является линейной лишь для идеального полупроводника, безгранично длинного в направлении оси X и при ограниченных значениях индукции. Практически линейной можно считать функцию преобразования такого датчика, в котором отношение длины к ширине больше чем 2...3 и верхний предел диапазона преобразования за индукцией не превышает 1...5 Тл.

ЭДС Холла может быть постоянной или переменной в зависимости от того, в какое поле помещен датчик и каким током он питается. Если индукция исследуемого поля и ток питания постоянны, тогда e_h – постоянная. Если индукция поля постоянная, а ток питания переменен (или наоборот), тогда будет переменной и той же частоты, что и частота переменной входной величины.

В полупроводниках с p -проводимостью при том же направлении тока и магнитного поля полярность ЭДС Холла будет противоположной полярности

Преобразователи малых перемещений (рисунок 9.35) могут быть выполнены с использованием одного датчика Холла или дифференциально включенных двух датчиков Холла. В таких преобразователях в качестве рабочей используется линейный участок функции преобразования.



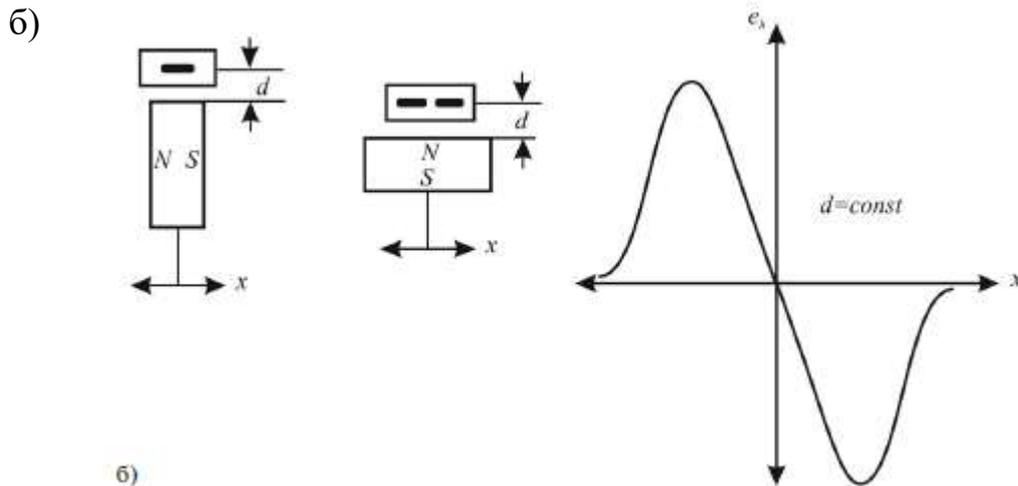


Рисунок 9.35 – Схемы применения эффекта Холла для измерения перемещения

10. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЕЧНОГО ПОЛОЖЕНИЯ

В основу их принципа действия положено измерение расстояния до объекта, но в отличие от датчиков перемещения, они не выдают измерительную информацию непрерывно. Датчики конечного положения могут иметь только два состояния на выходе, определяющие, находится контролируемый объект в заданном положении или нет.

Построить датчик конечного положения можно на основе любого преобразователя перемещений, сравнивая выходной сигнал от него с опорным значением с помощью компаратора, однако существуют и специальные виды преобразователей, работающие только с заданными положениями.

10.1. Концевой выключатель

Это электромеханическое устройство, которое подаёт управляющий сигнал при передвижении исполнительно механизма в крайнее или фиксированное положение. Также его ещё называют конечным выключателем или концевиком. По принципу действия он схож с обычным выключателем, только применяется для срабатывания от нажатия на клавишу не человека, а подвижной части механизма. Таким образом концевой выключатель используется как ограничитель движения.

Устройство конечных выключателей показано на рисунке 10.1

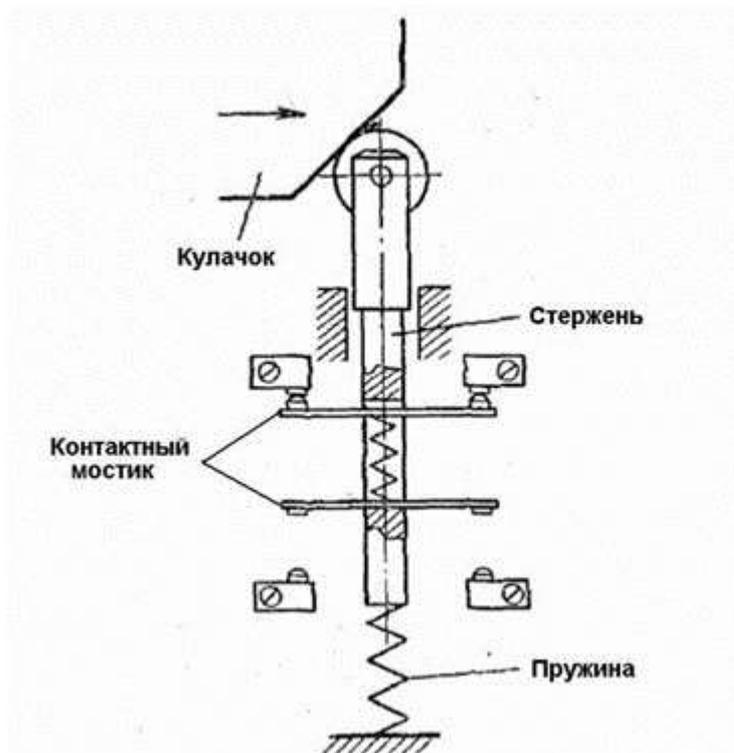


Рисунок 10.1 – Конструкция конечного выключателя

Конструкция любого такого устройства состоит из:

- корпус, он может быть выполнен из диэлектрического или токопроводящего материала, в зависимости от исполнения.
- подвижная часть, при воздействии на которую происходит нажатие на контактную группу.
- контактная часть, которая может содержать как замыкающие (нормально открытые), так и размыкающие (нормально закрытые) контакты.

Основными параметрами концевого выключателя являются максимальное коммутируемое напряжение и максимально возможный протекающий по контактам ток.

По конструкции подвижной части различают следующие виды:

- кнопочные;
- роликовые;
- рычажные.

10.2. Контактные преобразователи

Контактными называются измерительные преобразователи, в которых измеряемое механическое перемещение преобразуется в замкнутое или разомкнутое состояние контактов, управляющих электрической цепью. Таким образом, естественной входной величиной контактных преобразователей является пространственное перемещение. Простейшим контактным преобразователем является конечный выключатель, имеющий одну пару контактов.

При контроле размеров чаще всего используются двухпредельные контактные преобразователи с двумя парами контактов (рисунок). Встречаются конструкции многопредельных преобразователей с несколькими парами контактов (рисунок); контакты могут быть расположены как с обеих сторон контактирующего элемента, так и с одной его стороны. Контактные преобразователи могут работать либо на замыкание (или размыкание) всей цепи, либо на замыкание (размыкание) участка цепи (рисунок 10.2).

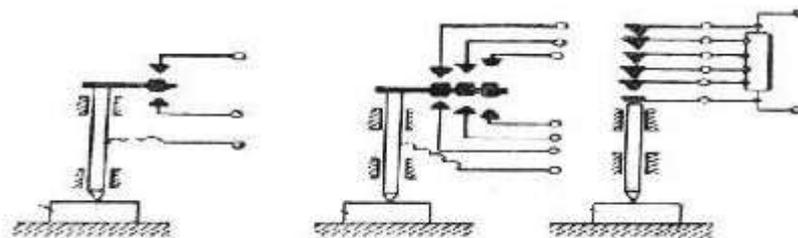


Рисунок 10.2 – Основные типы контактных преобразователей

10.3. Герконы

Геркон – герметизированный переключатель с пружинными контактами из ферромагнитного материала, соприкасающимися под действием магнитного поля.

Достоинством герконов является высокая надежность и долговечность коммутирующего элемента. Как составная часть герконы входят в конструкции различных датчиков, электромагнитных реле, особенно слаботочных, а также позиционных переключателей и некоторых других устройств.

10.3.1. Разновидности герконов

Так же, как и обычные контакты, герконы могут быть замыкающие (1 нормально - разомкнутый контакт), переключающие (1 переключающий контакт) и работающие на размыкание (1 нормально - замкнутый контакт). Это деление по функциональным признакам.

По признакам конструктивно - технологическим герконы делятся на две большие группы: с сухими контактами и с контактами ртутными.

В ртутных герконах внутри герметичного стеклянного корпуса кроме контактов находится еще капля ртути. Назначение этой ртутной капельки – смачивание контактов во время срабатывания для улучшения качества контакта за счет уменьшения переходного сопротивления, а кроме того для избавления от дребезга контактов.

10.3.2. Устройство герконов

Конструкция магнитоуправляемого контакта (рисунок 10.3) выполнена из стеклянного баллона. В баллоне расположены контакты, изготовленные из

магнитных сердечников, которые приварены с торцов колбы. Наружные элементы магнитных сердечников подключены к сети питания.

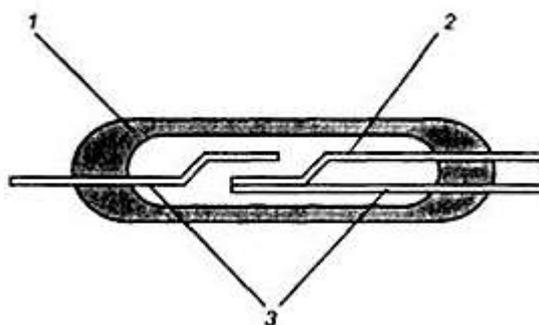


Рисунок 10.3 – Конструкция геркона:

1 – колба стеклянная; 2 – контакт переключения; 3 – стационарный контакт.

Контакты выполняются из проволоки прямоугольного сечения, с ферромагнитными свойствами. Также сердечники могут быть выполнены из пермаллоевой проволоки. Это зависит от размера и мощности герконового датчика.

Непосредственно контактирующие поверхности покрыты благородным металлом, золотом, палладием, родием, серебром и сплавами на их основе. Такое покрытие не только уменьшает переходное сопротивление, но и способствует повышению коррозионной стойкости контактной поверхности.

В колбу закачивают инертный газ, либо создают вакуум. Это не позволяет развиваться коррозии и ржавчине в датчике геркона. При производстве герконов необходимо учитывать, что имеется промежуток между сердечниками.

Для того, чтобы вызвать срабатывание контактной группы, необходимо вокруг геркона создать магнитное поле достаточной напряженности. При этом абсолютно не важно, как это поле будет создано, либо просто постоянным магнитом, либо электромагнитом. Силовые линии внешнего магнитного поля намагничивают внутренние контакты – сердечники геркона, в результате чего они преодолевают силы упругости, притягиваются и замыкают электрическую цепь.

В таком состоянии контакты будут находиться до тех пор, пока вокруг них есть магнитное поле достаточной напряженности: достаточно выключить электромагнит или убрать подальше обычный постоянный магнит, как контакты сразу разомкнутся. Следующее срабатывание контактов произойдет, когда магнитное поле появится вновь. Из всего сказанного можно сделать вывод, что контакты выполняют сразу три функции: упругих элементов (пружин), магнитопровода, и собственно проводящих контактов.

Несколько по-иному действует геркон, работающий на размыкание. Его магнитная система устроена так, что при воздействии магнитного поля

контакты – сердечники намагничиваются одноименно, поэтому отталкиваются друг от друга, размыкая электрическую цепь.

У переключающего геркона один из трех контактов, как правило, нормально - замкнутый выполняется из металла немагнитного, а оба нормально – разомкнутых контакта из ферромагнитного, как было сказано чуть выше. Поэтому при воздействии на геркон магнитного поля нормально разомкнутые контакты просто замыкаются, а немагнитный нормально – замкнутый, оставаясь на своем первоначальном месте, размыкается.

10.3.3. Способы управления герконами

Их можно разделить на две большие группы: управление постоянным магнитом и управление при помощи катушки с током. Эти способы показаны на рисунке 10.4.

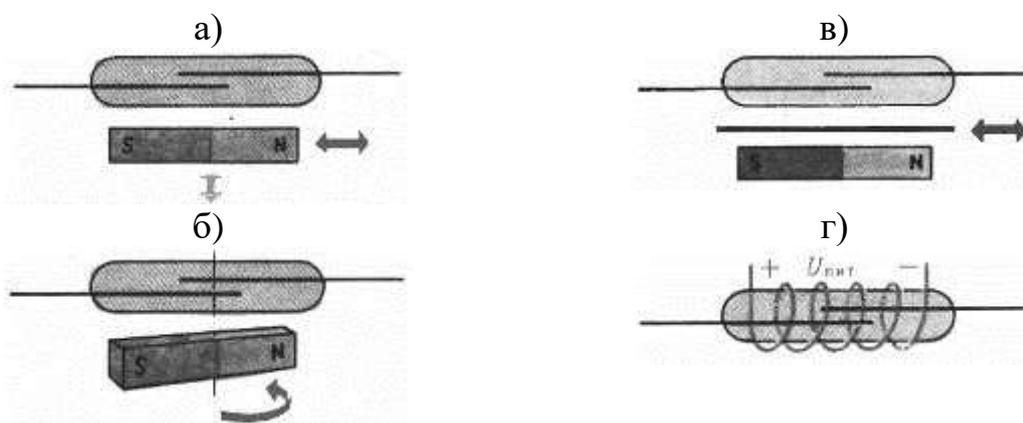


Рисунок 10.4 – Способы управления герконами:

а – перемещающимся магнитом; б – вращающимся магнитом; в – перемещающейся шунтирующей шторкой; г – управляющей обмоткой

10.3.4. Механические параметры герконов

К механическим параметрам относится магнитодвижущая сила срабатывания. Этот параметр показывает, при каком значении напряженности магнитного поля происходит срабатывание и отпускание контакта. В технической документации это называется как магнитодвижущая сила срабатывания (обозначается $V_{ср}$) и магнитодвижущая сила отпускания (обозначается $V_{отп}$).

Динамическими параметрами геркона является скорость его срабатывания и отпускания. Эти параметры измеряются обычно в миллисекундах и обозначаются соответственно как $t_{ср}$ и $t_{отп}$, которые характеризуют быстродействие геркона. Герконы, имеющие меньшие геометрические размеры обладают более высоким быстродействием.

Максимальное число срабатываний (ресурс) задает, при каком числе срабатываний все свойства геркона, как механические, так и электрические

сохраняются в пределах допустимых значений. В технической документации обозначается как N_{\max} .

10.3.5. Электрические параметры герконов

Основными электрическими параметрами герконов, как и обычных контактов, являются максимальное коммутируемое напряжение, обусловленное расстоянием между разомкнутыми контактами и инертной средой колбы, максимальный пропускаемый ток, ограниченный сечением и площадью контактов, сопротивление в замкнутом и разомкнутом состоянии и др.

10.4. Бесконтактные преобразователи

Все устройства бесконтактной коммутации можно разделить на:

10.4.1. Емкостные

Они основаны на взаимодействии с человеческим телом. Дело в том, что когда человек приближается к нему то возникает электрическая ёмкость, в результате которой, приводится в действие контур мультивибратора, установленный внутри концевика. Чем ближе приближается человеческое тело тем больше ёмкость и ниже частота импульса. Такой элемент обладает большой чувствительностью. Основную функцию выполняет пластина, плотно присоединенная к конденсатору.

Емкостные датчики приближения выполняются либо в форме измерительных преобразователей, либо в форме выключателей. Их принцип действия состоит в том, что находящееся рядом тело изменяет диэлектрическую проницаемость конденсатора, вследствие чего происходит разбаланс моста, в одном из плеч которого размещается указанный конденсатор. Емкостные приборы дороже индуктивных, однако они способны воспринимать приближение тел, выполненных из различных материалов в более широком диапазоне расстояний.

10.4.2. Индуктивные

Это электронный бесконтактный выключатель, который отзывается на передвижение магнитного материала. В зависимости от этого такой датчик оснащён металлическим или же немагнитным сердечником. При приближении или отдалении объекта, на который настроено срабатывание, он вырабатывает электрические импульсы, которые обрабатываются пороговым элементом, и даётся сигнал на закрытие или открытие ключа.

В индуктивном датчике приближения используется настроенный генератор. Когда проводящее тело приближается к датчику, происходит затухание колебаний, воспринимаемое схемой сопряжения. Более общими и простыми устройствами являются, индуктивные выключатели приближения, в которых с помощью интерфейсной схемы производится их включение или выключение при приближении к ним проводящего тела.

10.4.3. Оптические

Это особая разновидность датчиков конечного положения, которая оснащена инфракрасным светодиодом и специальным транзистором, улавливающим этот сигнал (фототранзистором). Оптический элемент работает вне зависимости от естественного освещения. При прерывании луча светодиода фотоэлемент будет закрываться, тем самым выключая исполнительный механизм, в схему которого он подключен.

11. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКОРОСТИ

Параметрами механического движения (кроме перемещения), подлежащими измерению на практике, являются скорость и ускорение. Это кинематические параметры и они связаны между собой.

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

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

Наиболее распространённые методы измерения линейных скоростей движущихся твёрдых тел: аэрометрический, компенсационный, термодинамический, корреляционный, доплеровский, электромагнитный, инерциальный и др.

Линейная скорость определяется обычно косвенным методом путем преобразования линейной скорости во вращение маховика или шестеренки. Затем угловая скорость измеряется с помощью углового измерительного преобразователя.

11.1. Аэрометрический метод

Аэрометрический метод (рисунок 11.1) основан на измерении скоростного (динамического) напора, функционально связанного со скоростью тела, движущегося в воздушной среде.

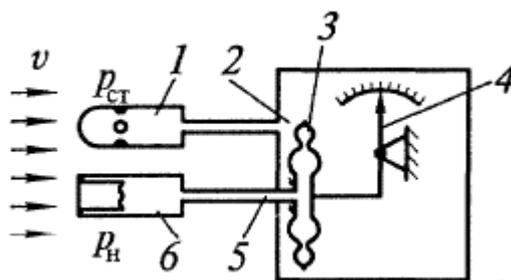


Рисунок 11.1 – Принцип работы аэрометрического метода

Скоростной напор определяется манометрической коробкой 3 путём сравнения статического давления, образуемого при движении воздушной среды в приёмнике статического давления 1 и приёмнике полного давления 6. Результат сравнения показывается стрелкой 4 на отсчётном устройстве. Средства измерения, построенные на аэрометрическом методе, позволяют измерять скорость с погрешностью, не превышающей 2...3%.

11.2. Компенсационный метод

Компенсационный метод (рисунок 11.2) основан на автоматическом уравнивании полного давления $p_{п}$ и давления $p_{к}$, развиваемым воздушным компрессором 1.

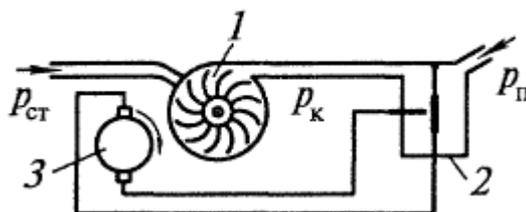


Рисунок 11.2 – Схема компенсационного преобразователя

В манометрическом реле 2 с двумя полостями, в одну из которых поступает полное давление $p_{п}$, а во вторую - давление $p_{к}$, $p_{п}$ и $p_{к}$ уравниваются. Замыкание цепи двигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда давление $p_{п}$ больше $p_{к}$. При этом мембрана манометрического реле 2 прогибается влево. При замыкании и размыкании контактов частота вращения электродвигателя поддерживается такой, при которой обеспечивается равенство $p_{п}$ и $p_{к}$.

11.3. Термодинамический метод

Термодинамический метод (рисунок 11.3) основан на измерении температуры заторможенного потока воздушной среды с помощью открытой термопары 7 и экранированной термопары 4 (либо других преобразователей температуры).

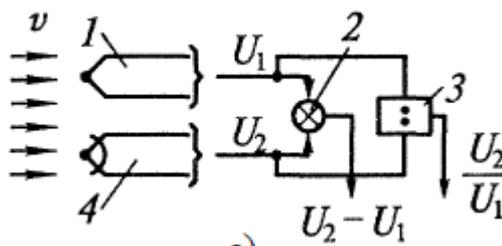


Рисунок 11.3 – Схема термодинамического преобразователя

Разность сигналов этих термодпар улавливается сумматором 2 и делителем 3. Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры. Погрешности средств измерений скоростей по этому методу обусловлены непостоянством параметров преобразователей температуры (1 и 4).

11.4. Турбинный метод

В турбинном методе (рисунок 11.4) используется кинетическая энергия воздушного или водного потока для вращения тангенциальной 1 или аксиальной 2 турбинки.

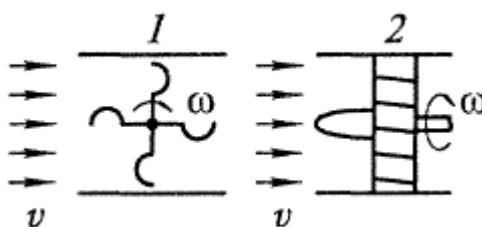


Рисунок 11.4 – Схема турбинного преобразователя

Частота вращения турбинки ω будет пропорциональна скорости движения.

12. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В настоящее время наиболее широкое распространение в технике получили следующие методы измерения и контроля скоростей вращения: центробежные, магнитоиндукционные, электрические (постоянного и переменного тока), индукционные и стробоскопические.

12.1. Центробежные преобразователи

Центробежный метод характерен тем, что чувствительный элемент реагирует на центробежную силу, развиваемую неуравновешенными массами вращающегося вала.

В коническом тахометре (рисунок 12.1) на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузики, которые под действием центробежных сил расходятся, перемещая вдоль оси муфту 1 и сжимая пружину 2. Изменение

положения муфты 1 регистрируется показывающим элементом тахометра - стрелкой.

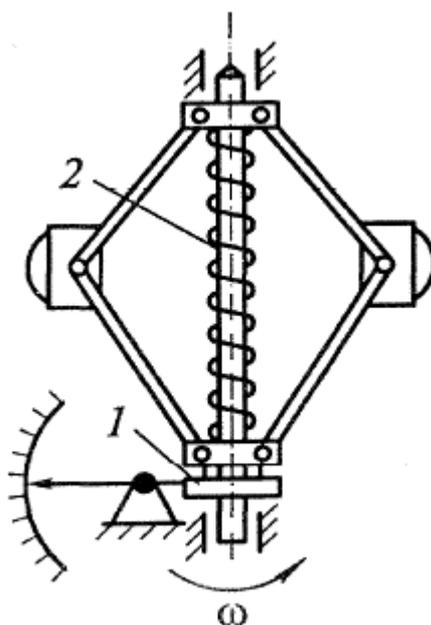


Рисунок 12.1 – Конструкция центробежного тахометра

12.2. Магнитоиндукционный преобразователь

Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения. Тахометры, построенные на этом методе, выполняются в двух вариантах: с цилиндрическим чувствительным элементом (рисунок 12.2а) и дисковым чувствительным элементом (рисунок 12.2б).

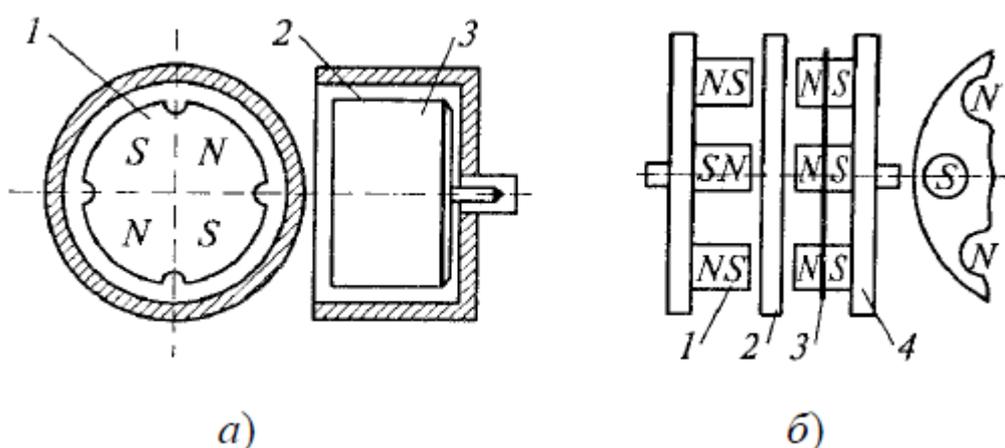


Рисунок 12.2 – Конструкции магнитоиндукционных преобразователей

Основной частью магнитоиндукционного тахометра являются измерительный узел, который состоит из постоянного магнита 1 и чувствительного элемента 2, выполненного в виде полого цилиндра или диска. Обычно постоянный магнит имеет частоту вращения, которую необходимо

измерить, а чувствительный элемент, выполненный из металла с большим удельным сопротивлением, удерживается от вращения спиральной пружиной. За счёт взаимодействия магнитных полей постоянного магнита и вихревых токов создаётся вращающий момент, вызывающий поворот чувствительного элемента на угол, зависящий от значения измеряемой скорости вращения. В целях уменьшения температурной погрешности от непостоянной магнитной индукции в зазоре применяют термомагнитный шунт 3.

12.3. Импульсные преобразователи

Принцип действия импульсных преобразователей угловой скорости основан на подсчете количества импульсов, генерируемых преобразователем при вращении контролируемого объекта, за единицу времени. Для генерации импульсов на вращающемся объекте (вал, шкив, ротор и т.п.) выполняются неоднородности различного вида (рисунок 12.3), при прохождении которым возле неподвижно установленного преобразователя на последнем происходит изменение выходного сигнала (импульс).

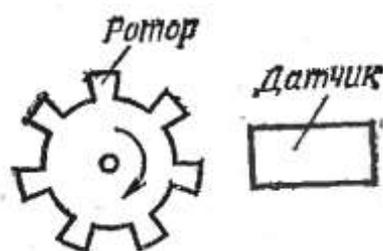


Рисунок 12.3 – Принцип действия импульсных преобразователей частоты вращения

Когда неоднородность проходит через приемный датчик, изменяется выходное напряжение. Подсчет количества изменений выходного сигнала в течение определенного временного интервала (временного интервала между двумя изменениями либо прочих связанных величин) и дает значение угловой скорости.

В импульсных тахометрах могут быть использованы, например, эффект Холла, индуктивные вихревые токи, оптические явления (в преобразователях приближения) и т.п. От вида используемого преобразователя зависит и вид, и способ нанесения неоднородности на вращающийся элемент.

12.3.1. Индукционные преобразователи

Принцип действия индукционных преобразователей основан на использовании явления электромагнитной индукции.

Известны две главных группы индукционных преобразователей. К первой принадлежат преобразователи, в которых изменение магнитного потока, который сцепляется с витками катушки, осуществляется перемещением последней в магнитном поле постоянного магнита или перемещением постоянного магнита относительно неподвижной катушки.

Это, в сущности, генераторы ЭДС, значение которой пропорционально скорости линейных или угловых перемещений соответственно катушки в постоянном магнитном поле или скорости перемещения магнитного поля относительно витков неподвижной катушки.

Во вторую группу входят преобразователи, в которых магнитный поток, который сцепляется с витками катушки, изменяется с помощью изменения магнитного сопротивления магнитной цепи, например, в результате изменения расположения подвижного ферромагнитного элемента (рисунок 12.4).

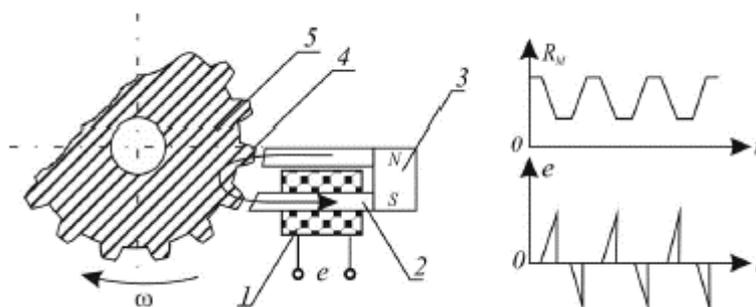


Рисунок 12.4 – Схема измерения частоты вращения индукционным преобразователем второго типа:

1 – катушка индуктивности; 2 – магнитопровод; 3 – постоянный магнит; 4 – зубцы; 5 – вращающийся объект

Ферромагнитный ротор с воспринимающим элементом выполняется здесь в виде постоянного магнита или катушки. Магнит создает магнитное поле вокруг чувствительного элемента. Когда зубец ротора пересекает поле, изменяется магнитный поток и индуцируется ЭДС в катушке. Преимуществом этого принципа преобразования является зависимость выходного сигнала от конфигурации зубцов ротора. Некоторые виды выходных импульсов для различных форм зубцов роторов приведены на рисунке 12.5

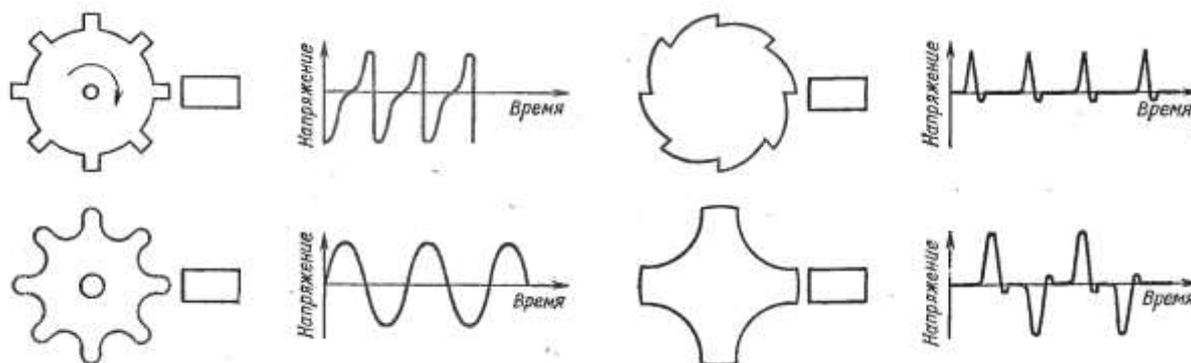


Рисунок 12.5 – Форма выходных импульсов индукционного преобразователя при различных видах зубцов вращающегося объекта

12.3.2. Герконы

На вращающемся объекте располагается один или несколько магнитов. Импульсы при работе преобразователя возникают при прохождении магнита возле геркона за счет срабатывания его контактов (рисунок 12.6)

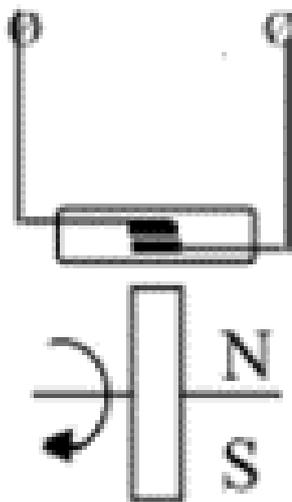


Рисунок 12.6 – Принцип действия преобразователя частоты вращения с герконом

12.3.3. Преобразователи с датчиками Холла

Импульсы сигнала в датчике Холла могут вызываться как магнитами, размещенными на вращающемся объекте (аналогично герконам), так и прерыванием магнитной цепи постоянного магнита (рисунок).

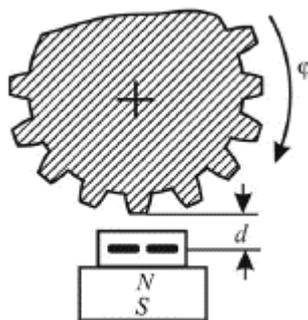


Рисунок 12.7 – Схема измерения частоты вращения датчиком Холла

12.3.4. Оптические преобразователи

Они могут работать как на пропускаемом свете, так и на отраженном. В первом случае источник света и фотоприемник расположены по разные стороны вращающегося тела (как правило тонкого диска), а перекрытие светового потока осуществляется непрозрачными сегментами диска (рисунок 12.8а) или перемычками в ряду отверстий, расположенных по окружности (рисунок 12.8б).

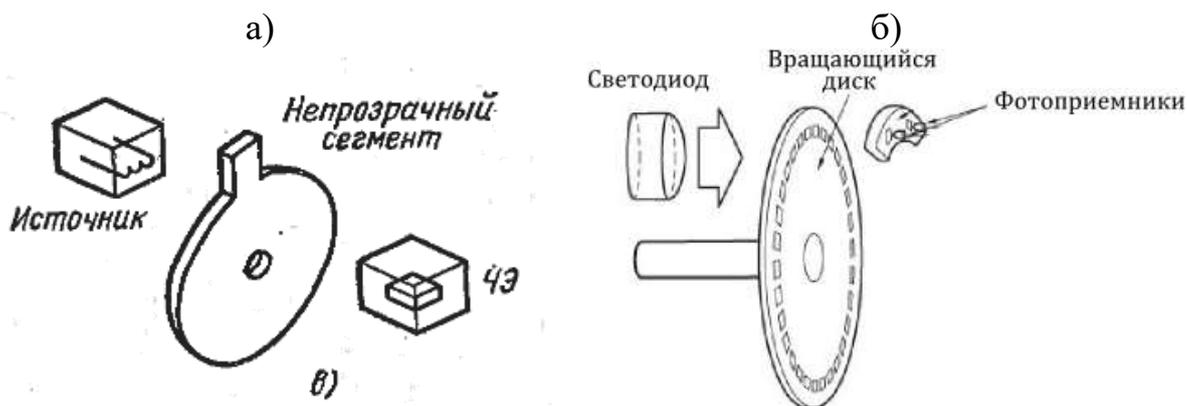


Рисунок 12.8 – Принцип действия оптических преобразователей частоты вращения

Во втором случае источник света и фотоприемник располагаются с одной стороны объекта, на котором формируются чередующиеся матовые и отражающие участки (рисунок 12.9).

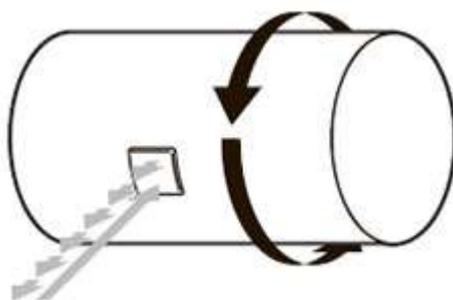


Рисунок 12.9 – Принцип действия оптического преобразователя частоты вращения, работающего на отраженном свете

12.4. Энкодеры

Энкодер – это датчик, который преобразует угол поворота объекта, в последовательность электрических импульсов, позволяющих определить угол поворота, направление вращения и в отдельных случаях положение относительно оси.

Энкодеры являются частными случаями импульсных преобразователей скорости вращения.

Энкодеры по принципу действия можно разделить на оптические, магнитные, емкостные, индуктивные, резистивные и механические; по способу выдачи информации на абсолютные и инкрементные.

Инкрементные энкодеры генерируют на выходе импульсы, по которым принимающее устройство определяет текущее положение вала путём подсчёта числа импульсов счётчиком. При этом абсолютной угол поворота вала неизвестен. Для привязки системы отсчёта к некоторому начальному положению отсчёта инкрементные энкодеры могут иметь нулевые (референтные) метки, которые при их прохождении подают сигнал по отдельному каналу.

Абсолютные энкодеры выдают на выходе сигналы, которые можно однозначно преобразовать в абсолютный угол поворота относительно начального положения.

12.4.1. Оптические энкодеры

Инкрементные оптические энкодеры имеют диск прерывания 1 с множеством окон одинакового размера на основном радиусе и две считывающих оптопары (А и В), что позволяет фиксировать как угол поворота, так и направление вращения вала (рисунок 12.10).

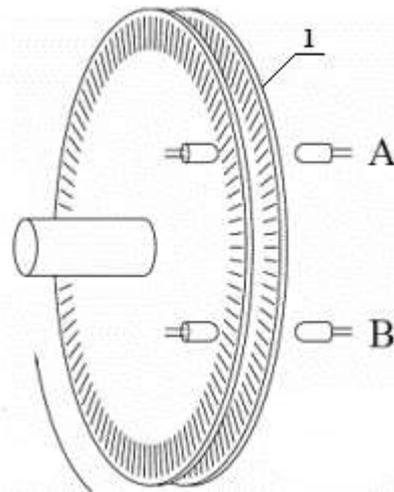


Рисунок 12.10 – Устройство оптического инкрементного энкодера

Оптопары А и В сдвинуты по окружности друг относительно друга на четверть периода (без учета целого числа периодов). Таким образом сигнал на одной оптопаре будет опережать сигнал на другой по фазе. По тому, на каком канале (А или В) сигнал будет опережать другой, определяется направление вращения (рисунок 12.11).

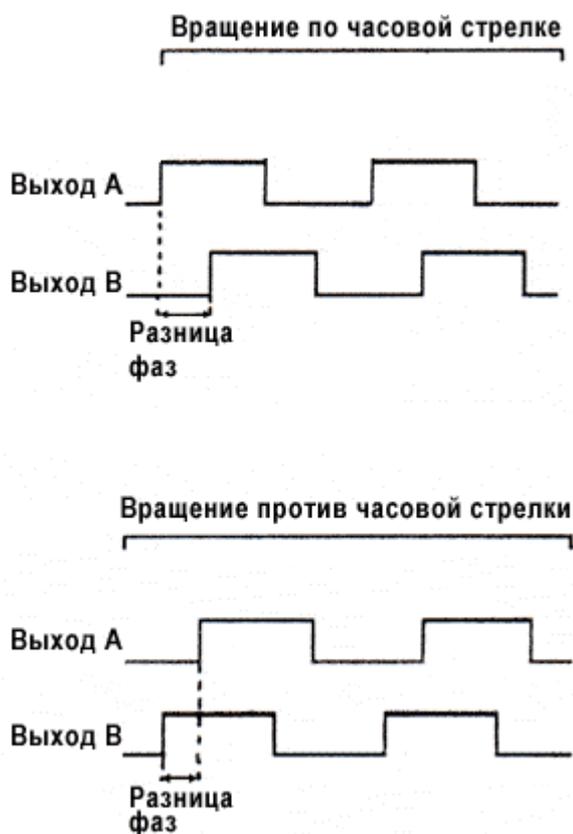


Рисунок 12.11 – Вид сигнала на выходе энкодера

Для определения начала отсчета на вспомогательном радиусе диска может размещаться единственное окно прерывания и еще одна оптопара, определяющие исходное положение (начало отсчета).

Для облегчения позиционирования оптопар на диске может наноситься два ряда отверстий, сдвинутых друг относительно друга на четверть периода (рисунок 12.12). Оптопары в таком случае располагаются вертикально.

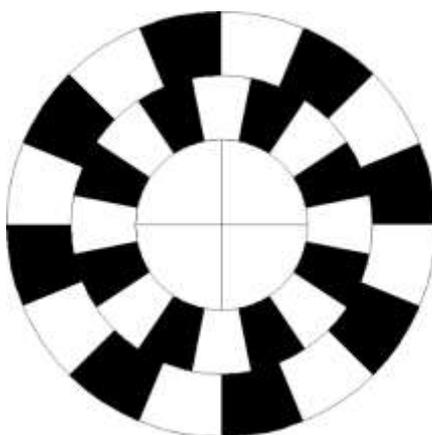


Рисунок 12.12 – Вид диска инкрементного энкодера с двумя рядами отверстий

В абсолютном оптическом энкодере на диске располагается несколько отверстий (напротив каждого ряда установлена оптопара), нанесенных таким

образом, что каждому угловому положению диска соответствует уникальная комбинация сигналов оптопар (рисунок 12.13).

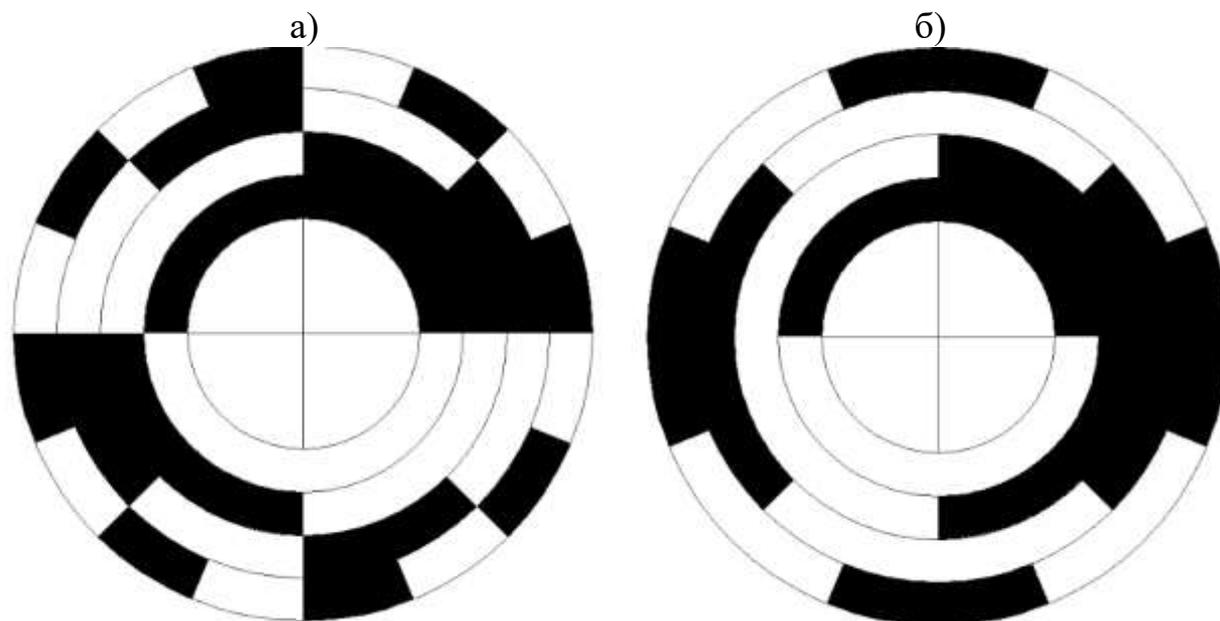


Рисунок 12.13 – Варианты кодирования углового положения диска оптического энкодера:
а – двоичный код; б – код Грея

12.4.2. Механические энкодеры

В механическом энкодере на неподвижном диске нанесены проводящие металлизированные дорожки по принципам, аналогичным оптическим энкодерам. При вращении скользящие контакты, установленные на валу, замыкаются с дорожками, пропуская сигнал по определенным выводам.

Механические энкодеры более дешевы, однако их ресурс работы ограничен (вследствие износа контактов и дорожек), а подвижные механические контакты при работе подвержены «дребезгу», т.е. потере соединения вследствие упругих колебательных процессов, что искажает выходной сигнал.

Механические энкодеры часто применяются как орган управления для аппаратуры.

12.4.3. Прочие энкодеры

Выходной сигнал энкодера может формироваться и другими видами преобразователей: магнитными, индуктивными, емкостными, резистивными и т.п.

12.5. Тахометрические генераторы

Тахометрическим генератором (тахогенератором) называется электрическая машина, работающая в генераторном режиме и

вырабатывающая электрическую энергию, по параметрам которой определяется скорость вращения.

Благодаря свойству обратимости электрических машин в качестве тахогенератора обычно используются электродвигатели малой мощности. Наиболее простым в использовании в качестве тахогенератора является двигатель постоянного тока с постоянными магнитами. Его выходным параметром является напряжение, значение которого прямо пропорционально скорости вращения вала.

Недостатком тахогенераторов любого типа является создание сопротивления вращающемуся объекту, величина этого сопротивления зависит от типа используемого двигателя и в общем случае тем больше, чем меньше входное сопротивление измерительной схемы, подключенной к тахогенератору.

Тахогенераторы могут иметь вид дополнительной обмотки, встроенной непосредственно в двигатель. Двигатели такого типа часто используются в системах контроля и автоматики.

12.6. Стробоскопы

Стробоскопический метод измерения угловой скорости основан на свойстве глаза сохранять видимое изображение на десятые доли секунды после его исчезновения. Средства измерения, построенные по этому принципу, являются наиболее точными из рассмотренных выше. Они нашли применение в лабораторных исследованиях, а также при создании образцовых средств измерений. Принцип реализации эффекта поясняет рисунок 12.14.

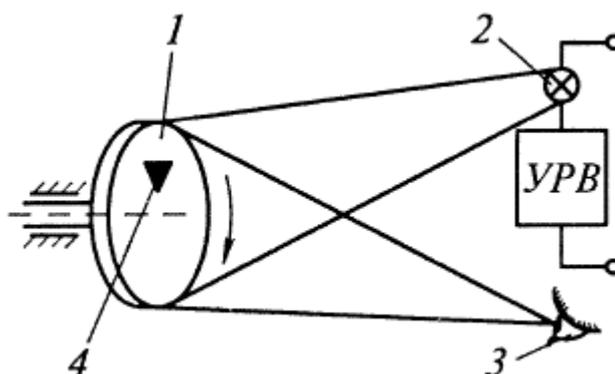


Рисунок 12.14 – Схема стробоскопического измерения частоты вращения

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

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

13. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ

Принцип действия, лежащий в основе всех измерительных преобразователей ускорения (часто называемых акселерометрами), заключается в том, что ускорение, которому подвергается преобразователь, вызвано силой, Действующей на некоторое тело (сейсмическую массу), что и приводит его в движение вместе с преобразователем. Сейсмическая масса прикрепляется к пружине (или непосредственно к прибору), которая противодействует ее перемещению. Поэтому масса движется до тех пор, пока сила пружины не уравновесит силу, действующую на массу вследствие ускорения. Измерение перемещения сейсмической массы по отношению к телу позволяет преобразователю производить вычисление и самого ускорения.

Для уменьшения потерь в осях подвеса, обеспечения линейной зависимости между отклонениями массы и измеряемым ускорением подвес помешают в жидкость с удельным весом, равным удельному весу чувствительного элемента, либо устанавливают его на воздушной подушке, на струнах. Применяют также электромагнитные и криогенные подвесы.

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

13.1. Акселерометр с сейсмической массой

На рисунке показан принцип действия акселерометра с одной сейсмической массой и пружиной, которой она крепится к корпусу прибора, а также измерительной шкалой с преобразователем. В неподвижном состоянии 1 (рисунок 13.1а) масса также неподвижна и на шкале устанавливается нуль. Но если к преобразователю прикладывается ускоряющая сила, то масса стремится оставаться в своем первоначальном состоянии вследствие присущей ей инерции, в то время как тело преобразователя движется. В результате изменяется положение шкалы относительно стрелки, индицирующей значение ускорения.

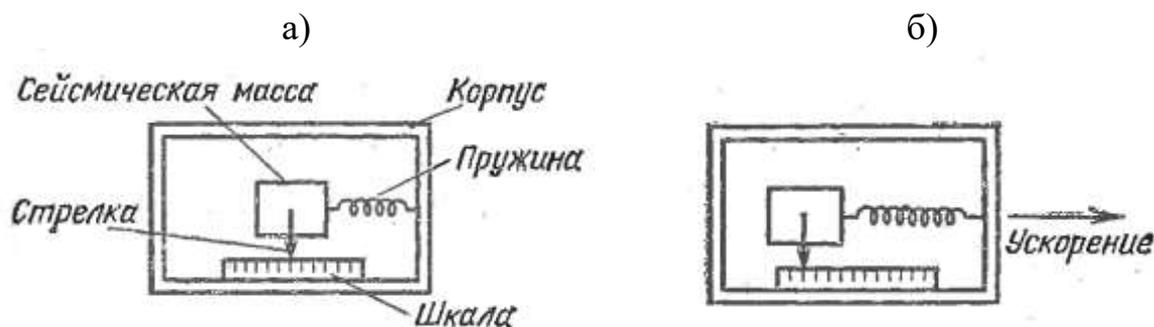


Рисунок 13.1 – Конструкция (а) и принцип действия (б) акселерометра с сейсмической массой

На практике же довольно часто существуют ускорения, действующие более чем по одной оси, и поэтому необходимы преобразователи, способные производить измерения в двух (двухосевые) или трех (трехосевые) направлениях.

Серьезной проблемой здесь является затухание. Если ускорение прикладывается к акселерометру простейшей конструкции, то оно может рассматриваться как ступенчатое возмущение. При этом масса будет колебаться вокруг своего конечного положения, а колебания будут обуславливать задержку измерений во времени.

Если ускорение действует на подпружиненную массу и вызывает ее перемещение, приводящее к изменению размеров одного или нескольких тензометров, то изменение сопротивления этих преобразователей вследствие напряжения будет отображать ускорение.

В акселерометрах могут использоваться все типы тензометрических преобразователей.

13.2. Струнный акселерометр

В акселерометрах со струнными преобразователями 1 и 5 (рисунок 13.2) смещение массы t меняет упругие свойства струн 2 и 4, натянутых в направлении оси чувствительности. Упругий подвес 3 исключает движение массы t в поперечном направлении. Сумма частот колебаний струн 2 и 4 ($f_1 + f_2$) поддерживается постоянной посредством регулирующего устройства 8, для чего она сравнивается с эталонной частотой f_0 , вырабатываемой генератором 6. Разность $\Delta f = (f_1 + f_2) - f_0$ используется для управления механизмом 7 натяжения струн. При поддержании значения $(f_1 + f_2)$ постоянным подучается линейная зависимость между измеряемым ускорением a_x и разностью частот Δf

Струнные акселерометры находят применение в инерциальных системах управления. При диапазоне измерения ускорений до $20g$ погрешность не превышает $\pm 0.004\%$.

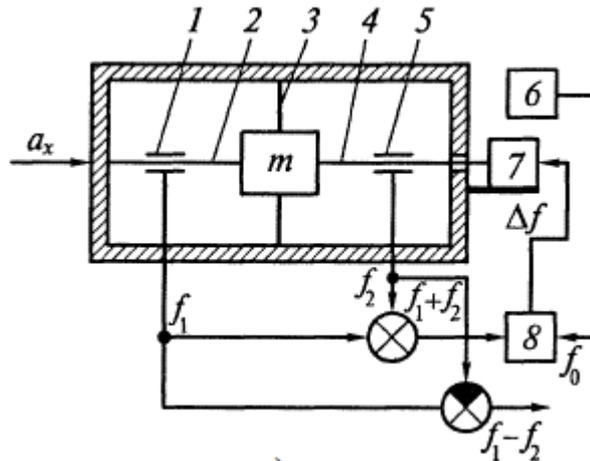


Рисунок 13.2– Схема струнного преобразователя ускорения

13.3. Емкостной акселерометр

Емкостной датчик ускорений состоит, по крайней мере, из двух пластин: стационарной, часто соединенной с корпусом, и свободно перемещающейся внутри корпуса, к которой подсоединена инерционная масса. Эти пластины формируют конденсатор, величина емкости которого зависит от расстояния d между ними, а значит и от ускорения движения, испытываемого датчиком. Максимальное перемещение, определяемое емкостным акселерометром, редко превышает 20 мкм. Следовательно, в таких датчиках всегда необходимо компенсировать дрейф различных параметров, а также подавлять всевозможные помехи.

Поэтому обычно акселерометры имеют дифференциальную структуру (рисунок 13.3), для чего в их состав вводится дополнительный конденсатор, емкость которого должна быть близка к емкости основного конденсатора. При этом напряжения на конденсаторы подаются со сдвигом фаз 180° . Тогда величина ускорения датчика будет пропорциональна разности значений емкостей конденсаторов.

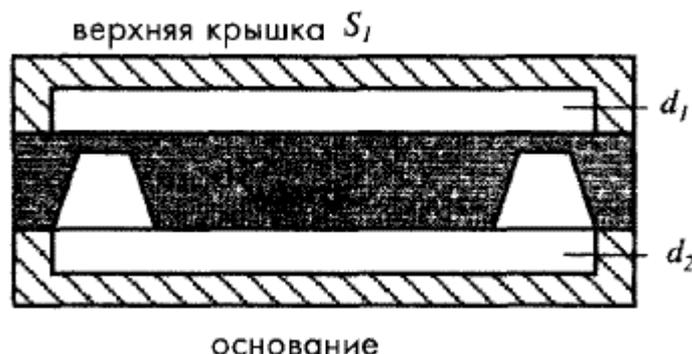


Рисунок 13.3 – Конструкция емкостного преобразователя ускорения

Инерционная масса расположена между крышкой и основанием. Масса поддерживается четырьмя кремниевыми пружинами. Верхняя крышка и

основание отделены от массы расстояниями d_1 и d_2 . Все три элемента изготовлены методами микротехнологий на одной кремниевой подложке.

При движении массы по направлению к верхнему электроду расстояние d_1 уменьшается, а расстояние d_2 увеличивается на ту же самую величину.

13.4. Акселерометры с нагреваемой пластиной

Поскольку принцип действия акселерометров заключается в определении перемещения инерционной массы, для проведения таких измерений можно воспользоваться основной формулой теплопередачи. Тепловой акселерометр, как и любой другой датчик ускорений, состоит из инерционной массы, подвешенной на тонкой консольной балке, расположенной рядом с теплоотводящей пластиной или между двух теплоотводящих пластин (рисунок 13.4).

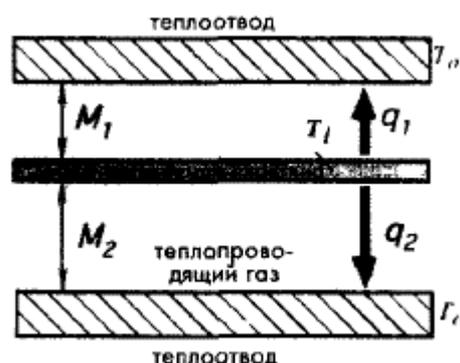


Рисунок 13.4 – Схема акселерометра с нагреваемой пластиной

Масса и балка изготовлены методами микротехнологий. Пространство между ними заполнено теплопроводящим газом. Масса нагревается при помощи встроенного нагревателя до заданной температуры T . Когда ускорения нет, между массой и теплоотводами устанавливается тепловое равновесие: количество тепла q_1 и q_2 переданное пластинам через газ пропорционально расстояниям M_1 и M_2 .

Температура в любой точке консольной балки, на которой закреплена инерционная масса, зависит от расстояния между ней и опорой x , а также от величины зазоров от нее до теплоотводов. Для измерения температуры на балке формируется детектор температуры. Эта температура, преобразованная в электрический сигнал, и является мерой величины ускорения.

13.5. Акселерометры с нагреваемым газом

Другой интересный акселерометр использует в качестве инерционной массы - газ. Он изготовлен на КМОП кристалле и является двухосевым измерителем ускорений. Принцип действия такого устройства основан на передаче тепла методом принудительной конвекции. Как известно, тепло может передаваться тремя способами: за счет теплопроводности, конвекцией и излучением. Конвекция может быть естественной (обусловленной силой

гравитации) и принудительной (для которой требуется применение внешних устройств, например, вентилятора). В акселерометрах с нагреваемым газом источником такой внешней силы является ускорение. Такие датчики определяют внутренние изменения в процессах теплопередачи в замкнутом объеме газа. Акселерометры с нагреваемым газом функционально эквивалентны традиционным акселерометрам с инерционной массой. В данном случае в роли инерционной массы выступает неравномерно нагретый газ. Такая инерционная масса обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционной твердотельной массой. Главным достоинством является высокий уровень допустимых перегрузок (до 50 000g), что значительно повышает их надежность.

Датчик состоит из пластины, примыкающей к герметичной полости, заполненной газом. В пластине вытравлено углубление. В центре кремниевой пластины над углублением подвешен нагреватель (рисунок 13.5).

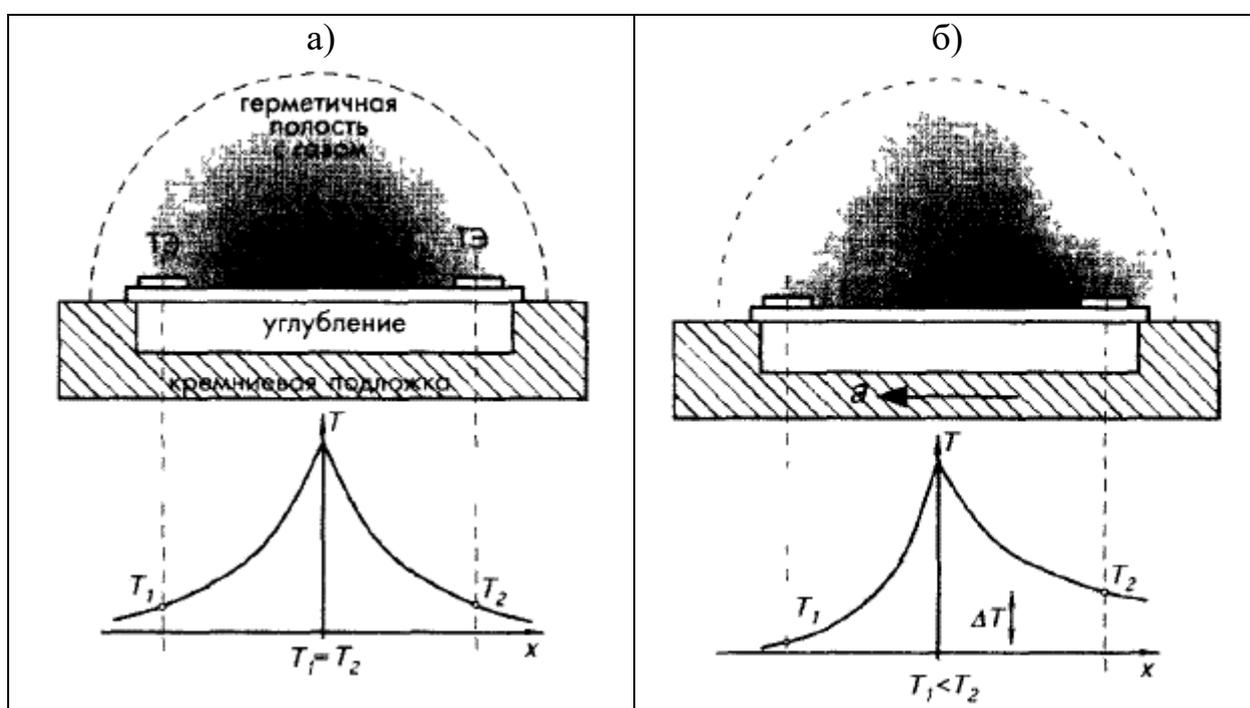


Рисунок 13.5 – Принцип работы акселерометра с нагретым газом

На пластине установлены четыре датчика температуры; термоэлементы из алюминия и поликремния (ТЭ). ТЭ расположены на одинаковом расстоянии с четырех сторон от нагревателя (две оси).

При нулевом ускорении распределение температуры внутри полости с газом симметрично относительно источника тепла, поэтому все четыре ТЭ детектируют одинаковую температуру, что приводит к нулевому выходному напряжению в каждой паре чувствительных элементов. Нагреватель разогревается до температуры выше температуры окружающей среды (обычно около 200°C). На рисунке а показаны два ТЭ, измеряющих градиент температуры вдоль оси x. Из рисунка видно, что наибольшая температура газа наблюдается рядом с нагревателем, и она довольно резко падает ближе к

краям, где расположены ТЭ. Когда на газ не действуют никакие силы, температура имеет конусообразное распределение вокруг нагревателя, при этом температура левого ТЭ T_1 , равна температуре T_2 правого ТЭ. Ускорение акселерометра в любом из направлений из-за конвекционной теплопередачи изменит температурный профиль, который станет несимметричным. На рисунке б показано, как изменится температурный профиль при ускорении a , направление которого указано стрелкой. Под действием ускорения теплые молекулы газа смещаются к правому ТЭ, передавая ему часть своей энергии. В результате этого температуры, а, следовательно, и выходные напряжения правого и левого ТЭ перестанут быть равными ($T_1 < T_2$). Разница температур ΔT , а значит, и напряжение между выходами ТЭ прямо пропорциональна ускорению. В данной конструкции существует два идентичных измерительных канала, позволяющих определять ускорение вдоль оси x и оси y .

Следует отметить, что чувствительность выходного сигнала АНГ меняется при изменении окружающей температуры. Для компенсации этого изменения в чип акселерометра встраивается температурный датчик (резистивный детектор температуры или кремниевый переход).

13.6. Гироскопы

13.6.1. Механический гироскоп

Механический гироскоп (рисунок 13.6) состоит из массивного диска, свободно поворачивающегося вокруг основной оси вращения, которая удерживается рамкой, способной вращаться относительно одной или двух осей.

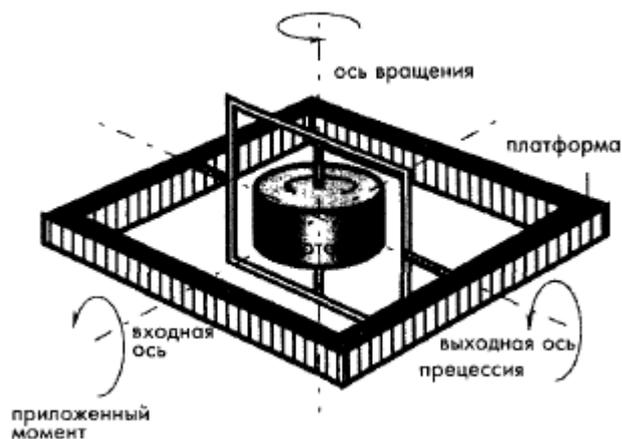


Рисунок 13.6 – Принцип действия механического гироскопа

Таким образом, в зависимости от количества осей вращения гироскопы имеют одну или две степени свободы. Следует отметить, что:

1. Основная ось вращения свободного гироскопа не будет менять свое пространственное положение, при отсутствии внешних сил, действующих на нее

2. При соответствующем изготовлении крутящий момент гироскопа (его выходной сигнал) пропорционален его угловой скорости движения вокруг оси, перпендикулярной основной оси вращения.

При свободном вращении диска (ротора) он всегда стремится сохранить свое осевое положение. Если платформа гироскопа вращается вокруг входной оси, у гироскопа появляется крутящий момент относительно перпендикулярной (выходной) оси, заставляющий основную ось вращения поворачиваться вокруг выходной оси. Это явление называется прецессией гироскопа.

13.6.2. Монолитные кремниевые гироскопы

Данный метод построения гироскопов основан на применении микротехнологий, позволяющих реализовать миниатюрные устройства, в которых вращающийся диск заменяется на вибрирующий элемент. Такой подход дает возможность использовать технологии, применяемые в электронной промышленности для налаживания серийного выпуска монолитных датчиков ускорений. В дополнение к этому гироскопы вибрационного типа имеют более прочную конструкцию и могут работать в довольно суровых окружающих условиях.

Все гироскопы вибрационного типа основаны на явлении ускорения Кориолиса. Если тело движется линейно внутри опорной рамки, вращающейся вокруг оси, перпендикулярной направлению движения, в нем возникает ускорение Кориолиса. Это ускорение прямо пропорционально скорости вращения тела относительно третьей оси, перпендикулярной плоскости, образованной двумя другими осями (рисунок 13.7).

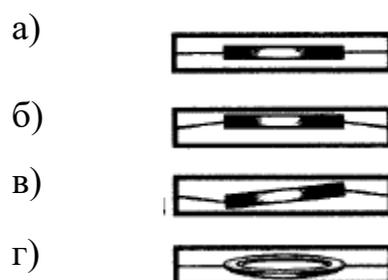


Рисунок 13.7 – Вибрирующий элемент при отсутствии ускорения (а) и при различных его направлениях (б –г)

13.6.3. Оптические гироскопы

Многие современные датчики, используемые в системах контроля и управления, реализуются на основе эффекта Саньяка, проиллюстрированного на рисунке 13.8. Два лазерных луча света распространяются в противоположных направлениях внутри оптического кольца радиуса R , обладающего коэффициентом преломления n . Соответственно один луч перемещается по часовой стрелке (CW), а второй - против часовой стрелки (CCW).

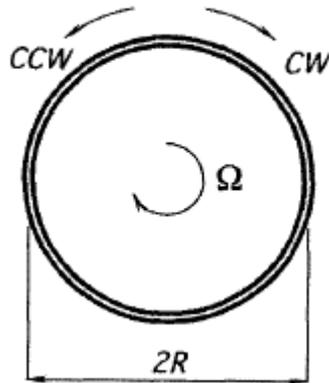


Рисунок 13.8 – Принцип действия лазерного гироскопа

Лучу света, чтобы сделать один оборот вокруг кольца, требуется время $\Delta t = 2\pi R / c$, где c – скорость света. Теперь предположим, что кольцо вращается с угловой скоростью Ω по часовой стрелке. В этом случае двум лучам, перемещающимся в противоположных направлениях, придется пройти разный путь. Для движущегося по часовой стрелке луча путь составит $l_{CW} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$, а для второго луча - $l_{CCW} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$. Следовательно, разница между путями составит:

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{c}$$

13.7. Методы и средства измерения параметров вибраций

При измерении вибраций всегда участвуют три элемента: вибрирующее звено, исходное звено и устройство для измерения движения вибрирующего звена относительно невибрирующего. Средство измерения параметров вибраций носит название виброметр (рисунок 13.9).

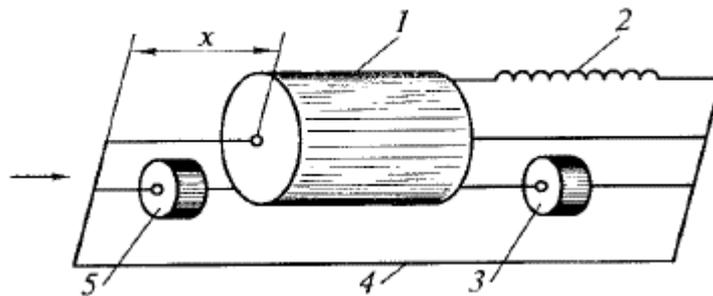


Рисунок 13.9 – Схема измерения вибрации

Обычно исходное (невибрирующее) звено создаётся с помощью массы, которая может перемещаться вдоль (или вокруг) оси вибраций. Масса 1 связывается с основанием прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 3. Преобразователь 5 выдаёт сигнал смещения корпуса относительно массы 1. в

зависимости от параметров массы 1, пружины 2 и демпфера 3. Сигнал может быть пропорциональным относительному перемещению массы 1 и основания прибора 4, относительной скорости или ускорению. Масса 1 виброметра носит название сейсмического элемента, а система, образуемая из массы 1, пружины 2 и демпфера 3 - сейсмической системы.

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

14. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

14.1. Общие положения термометрии

В теплоизолированной системе тела стремятся к температурному равновесию. Этот процесс происходит при любых условиях внутри изолированной системы, конечным состоянием которой оказывается температурное равновесие – во всех точках системы температуры становятся одинаковыми.

Многие физические величины зависят от температуры, поэтому в принципе термометрия может основываться на измерении любого параметра вещества, однако для удобства и правильности измерения величина, по изменению которой судят о температуре, должна однозначно, непрерывно и монотонно быть связанной с измеряемым аргументом – температурой. Эта величина, с одной стороны, не должна зависеть от других параметров, а с другой – должна быть точно воспроизводимой и измеряемой простым, надежным и удобным способом. Для точной интерполяции и экстраполяции температурной шкалы желательно, чтобы зависимость между величиной измеряемого параметра и температурой была линейной.

Параметр, удовлетворяющий если не всем, то хотя бы большинству изложенных требований, называется термометрическим, и вещество, при помощи которого производится измерение термометрического параметра, также называется термометрическим.

Современная термометрия не располагает ни веществом, ни параметром, которые бы полностью удовлетворяли всем предъявляемым – требованиям. В какой-то мере удовлетворительными и нашедшими применение в измерительной практике являются следующие параметры: давление или объем газов, объем жидкостей, электрическое сопротивление проводников и полупроводников, термо-э.д.с. некоторых пар проводников и полупроводников, параметры излучения.

14.2. Жидкостные термометры

Жидкостные термометры были первыми, получившими массовое распространение. Показания их не требуют никакой вспомогательной аппаратуры и источников энергии. Именно поэтому до настоящего времени они применяются наиболее широко. Диапазон измерения температур

жидкостными термометрами охватывает от -200 до 1200 °С. Высокотемпературными термометрами измеряются температуры до 1200 °С. Из общего количества термометрических приборов, изготавливаемых промышленностью, около половины приходится на стеклянно-жидкостные. Они наиболее дешевы в массовом производстве.

Из жидкостных термометров наиболее точны и просты в обращении ртутные, отличающиеся равномерностью шкалы. Ртуть химически не активна, она не смачивает стекла и не загрязняет поверхности.

При измерении высоких температур применяют галлий. Часто ртуть заменяют более дешевыми окрашенными жидкостями: спиртами, толуолом, их смесями и др.

В последнее время ртутные термометры с большим успехом заменяются платиновыми и медными термометрами сопротивления.

14.2.1. Ртутные термометры

Ртутные термометры широко применяются благодаря физико-техническим свойствам ртути. Все жидкостные стеклянные термометры состоят из сосуда (шарика), переходящего в запаянную сверху капиллярную трубку. Сосуд и капилляр обычно изготавливают из одинакового материала. Для умеренных и низких температур используются стекла, обладающие малыми коэффициентами температурного расширения; для температур выше 600 °С необходимо применять плавленый кварц.

Нижним пределом, ограничивающим применение ртути, является температура замерзания последней $-38,9$ °С. Температура кипения ртути при атмосферном давлении (357 °С) не является предельной. Для повышения верхнего предела пространство капилляра над ртутью заполняют инертным по отношению к ртути азотом.

При температуре до 550 °С заполнение азотом проводят при давлении $2,5 \times 10^6$ Н/м², а при температуре до 750 °С – при давлении $10,0 \times 10^6$ Н/м².

14.2.2. Термометры с нертутным заполнением

Термометры с нертутным заполнением применяются не только из экономических соображений. Так, спиртовые и толуоловые термометры используются для измерения температур от -70 °С. Существуют нестандартные термометры, заполненные пентаном, которые позволяют производить измерения температур от -200 °С. Применяемые термометрические жидкости по природе своей бесцветны, поэтому для улучшения условий наблюдения в них добавляют красители. Подбор эффективных красителей для нертутных жидкостей является одной из основных задач технологии изготовления термометров. Краситель не должен оставаться на стенке капилляра, не должен реагировать с рабочей жидкостью и стеклом, а также каталитически воздействовать на термометрическую жидкость. Все эти свойства краситель должен стабильно сохранять во времени и во всем диапазоне измеряемых температур. Красители, которые бы

одновременно удовлетворяли всем предъявляемым требованиям, к сожалению, до сих пор найти не удалось.

Интересным решением вопроса является применение чистой жидкости и получение окраски путем внесения в капилляр тончайшей цветной стеклянной полоски. Последняя хорошо различима через заполненный жидкостью капиллярный канал, который играет роль цилиндрической линзы. Пустой канал не обладает такими оптическими свойствами.

14.2.3. Чувствительность, цена деления, точность измерения

Теоретически чувствительность можно неограниченно повышать за счет увеличения объема сосуда и уменьшения сечения капилляра. Однако на практике оказывается, что возникающие трудности определенным образом ограничивают наши возможности.

Шаг делений на шкале обычно устанавливается около 1 мм при наблюдении невооруженным глазом. Большие значения шага обычно присущи демонстрационным и метеорологическим термометрам, наблюдаемым с больших расстояний. При меньшем шаге необходимо применять оптическую аппаратуру.

Существенная погрешность возникает в тонких капиллярах из-за своеобразного проявления молекулярных сил в несмачивающей жидкости. Явление состоит в следующем: при постепенном прогреве сосуда вершина столбика перемещается скачкообразно, что наблюдается даже на обычном медицинском термометре. Возможно, скачкообразное перемещение связано с микронеравномерностью сечения капилляра по длине. Поскольку давление в жидкости определяется поверхностным натяжением и зависит от радиуса мениска, на показания начинает влиять не только температура, но и характер и направление ее изменения (одинаковой температуре соответствуют разные показания).

Цена деления стандартных термометров выбирается не менее 0,01 град.

В лабораторных условиях при учете изложенных выше особенностей могут быть созданы специальные термометры с ценой деления на один и даже два порядка меньше 0,01 град.

14.2.4. Поправка на выступающий столбик.

На практике очень редко удастся поместить весь термометр в область, где производится измерение температуры. Обычно в область измерения погружается сосуд и некоторая часть столбика жидкости в капилляре. Весь остальной столбик в капилляре имеет другую (непостоянную во времени и пространстве) температуру. В связи с этим при точных измерениях следует вводить поправку на температуру выступающего столбика. Величина поправки даже при больших разностях температур невелика, поэтому значение поправочной температуры выступающего столбика может быть оценено приближенно.

Существуют конструкции термометров со встроенным вторым термометром, по которому судят о температуре выступающего столбика. Обычно же к выступающей части основного термометра теплоизоляционным (асбестовым) шнуром прикрепляется вспомогательный термометр так, чтобы его сосуд находился примерно в середине выступающей части столбика основного термометра.

Для специальных условий работы, например, в вискозиметрах, изготавливаются термометры, в которых деления на шкале нанесены с учетом поправки на выступающий столбик и при предположении, что окружающая температура будет равна 20°C . Это следует учитывать при измерении температуры таким специальным термометром в неспециальных условиях и вносить обратную поправку.

14.2.5. Чувствительность термометров к давлению.

Повышение внешнего давления приводит к сокращению объема сосуда и поперечного сечения капилляра. Обычно внутренние объемы термометров герметизированы, поэтому внутреннее давление может быть только функцией измеряемой температуры. Таким образом, повышение внешнего давления приводит к повышению уровня вершины столбика в капилляре. Это явление в достаточной мере заметно и подлежит учету даже при не очень точных измерениях.

Для ртутных стеклянных термометров емкость сосуда эквивалентна емкости капилляра длиной, соответствующей примерно 6000 град. На чувствительном термометре можно наблюдать изменения температур в 0,001 град, т. е. система термометра чувствительна к относительным изменениям объема сосуда, равным $0,17 \times 10^{-6}$.

Чувствительность термометров к внешним силовым воздействиям настолько велика, что наблюдается разница в показаниях термометра, когда при прочих равных условиях его положение изменяется с вертикального на горизонтальное. Поправка пропорциональна высоте столбика жидкости $A = k \times L$. Коэффициент пропорциональности для ртутных стеклянных термометров $k = 0,1$ град/м. В длинных термометрах поправка достигает нескольких сотых долей градуса.

14.2.6. Старение стекла

Старение стекла термометров происходит медленно, если не принять соответствующих мер. Вследствие релаксации внутренних напряжений размеры изделия сокращаются, что приводит к увеличению показаний термометра. В холодном состоянии стекло продолжает деформироваться, и систематическое искажение показания составляет 0,01 – 0,04 град/год.

Ра первый год все же происходит рост показаний термометра примерно на 0,01–0,02 град. В дальнейшем процесс со временем затухает. Это необходимо иметь в виду при точных измерениях старыми термометрами.

14.2.7. Депрессия нулевой точки термометра.

Вследствие специфических свойств стекол размеры деталей термометров являются функцией не только температуры, но и характера ее изменения в течение длительного времени. Даже идеально состаренные стеклянные предметы после каждого нагрева и охлаждения приобретают свойственные им размеры лишь по истечении нескольких десятков часов. Что касается термометров, то после нагрева и охлаждения они в фиксированной нулевой точке показывают температуру <0 . Соответствующее отклонение получается во всем диапазоне измерения. Это явление называется депрессией нулевой точки.

Для старых термометров, изготовленных из обычных термометрических стекол, значение депрессии составляет $0,2 - 0,6$ град. Установлено, что в случае примерно одинакового содержания окислов калия и натрия в стекле явление депрессии наиболее ярко выражено, причем стекла с большим содержанием калиевых и натриевых солей менее подвержены депрессии.

При измерениях температур, лежащих выше 100°C , учет депрессии теряет смысл.

14.2.8. Максимальные термометры

Существует два вида конструкций максимальных термометров.

Первые основаны на том, что через тонкий пережим в капилляре ртуть проходит под давлением, но под действием разрежения ртутный столбик «разрывается». Проще всего пережим получить, если вставить в начальный участок капилляра тонкий стеклянный стерженек (нить). Снизу стержень припаивается ко дну резервуара термометра. Столбик ртути «разрывается» на пережиме и остается в капилляре на уровне максимальной температуры. При повторном повышении температуры (после достижения предыдущего максимума) столбик «соединяется» и термометр регистрирует дальнейшее повышение температуры. Сбой показаний термометра осуществляется встряхиванием.

В капиллярный канал максимальных термометров второго типа закладывают миниатюрный ползунок, обычно удерживающийся в канале специальной пружинкой благодаря трению. При соприкосновении мениска с ползунком поверхностное натяжение (архимедовы силы практически не играют роли) способствует выталкиванию ползунка из ртути. При снижении мениска ползунок остается в самой высокой точке, указывая, таким образом, максимальную температуру, измеренную термометром. Ползунок изготовляют из железа, стекла или иного материала, не поддающегося амальгамированию.

Для обоих типов максимальных термометров в качестве термометрической жидкости применяется только ртуть. При перемещении мениска через ползунок его радиус уменьшается в несколько раз. В идеальном случае при бесконечно тонком центральном ползунке радиус мениска

уменьшается в два раза, вследствие чего силы поверхностного натяжения препятствуют возможности прохождения ползунка через выпуклую поверхность мениска.

14.2.9. Минимальные термометры

Их действие основано на том, что мениск смачивающей жидкости все время удерживает ползунок внутри жидкости, благодаря чему в таком термометре ползунок стягивается мениском вниз до положения, соответствующего минимальной температуре. Причем ползунок не оказывает никакого сопротивления медленному перемещению столбика термометрической жидкости вверх. Приведение ползунка в соприкосновение с мениском (начальное положение) производится так же, как и в максимальном термометре, – встряхиванием.

14.2.10. Электроконтактные термометры

В промышленности используются ртутные электроконтактные термометры (рисунок 14.1), предназначенные для сигнализации и поддержания определенной температуры (с постоянным или подвижным контактом).

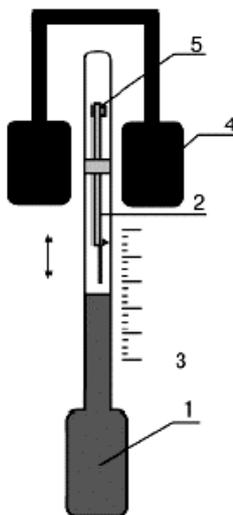


Рисунок 14.1 – Конструкция ртутного электроконтактного термометра

При нагревании ртуть 1 расширяется и касается поверхностью контактного проводника 2, положение которого фиксируется специальным устройством 5. Положение проводника можно изменять вращением магнита 4, расположенного внутри корпуса термометра.

14.3. Дилатометрические термометры

Действие дилатометрических термометров основано на относительном удлинении под влиянием температуры твердых тел, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

Зависимость длины l твердого тела от его температуры t выражается равенством $l = l_0(1 + \alpha t)$, где l_0 – длина тела при температуре 0°C , α – средний температурный коэффициент расширения тела, K^{-1} .

Дилатометрические термометры подразделяются на стержневые (жезловые) и биметаллические.

Устройство простейшего стержневого дилатометрического термометра показано на рисунке 14.2.

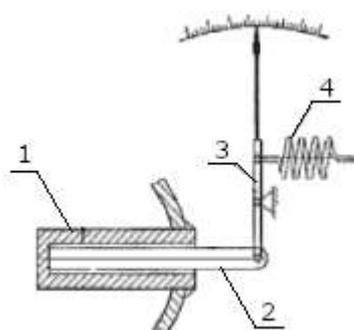


Рисунок 14.2 – Устройство дилатометрического термометра

В среду, в которой измеряется температура, помещается закрытая с одного конца трубка 1, изготовленная из материала с большим коэффициентом линейного расширения. В трубке размещен стержень 2, прижимаемый к ее дну рычагом 3 с пружиной 4. Изменение температуры приводит к изменению длины трубки и, соответственно, к перемещению стержня, выполненного из материала с малым коэффициентом линейного расширения, и потому сохраняющего свои размеры. Перемещение стержня вызывает перемещение стрелки на шкале. Это перемещение с помощью механического устройства передается на показывающую стрелку 3.

14.4. Биметаллические термометры

Принцип действия биметаллических термометров основан на зависимости деформации чувствительного элемента от измеряемой температуры.

Чувствительный элемент биметаллических термометров изготавливается из пластины, состоящей из двух или более слоев разнородных металлов, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения. Пластина может быть предварительно деформирована. Один конец чувствительного элемента закрепляется, а второй соединяется с передаточным или непосредственно показывающим устройством. При нагреве биметаллической пластины из-за различия коэффициентов линейного расширения ее слоев пластина изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения пропорционально измеряемой температуре.

На рисунке 14.3 показаны конструкции наиболее распространенных чувствительных биметаллических элементов.

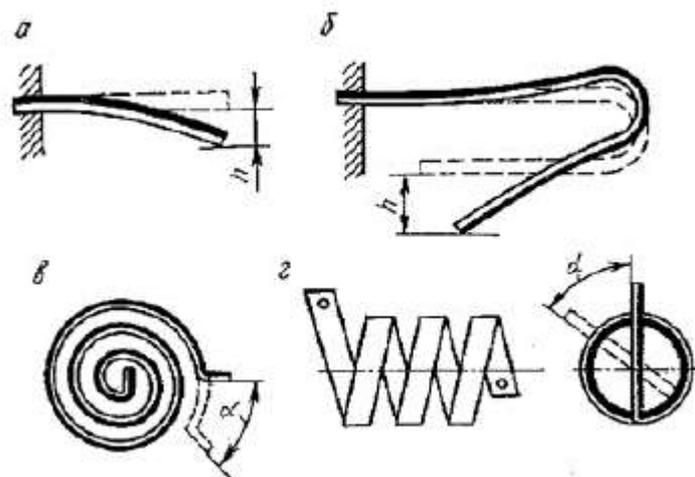


Рисунок 14.3 – Конструкции биметаллических элементов

Конструкции (рис. 6. а и рис. 6. б) используются главным образом в качестве реле температуры, остальные - со спиральными (рис. 6. в), винтовыми (рис. 6. г) и отклоняющимися (рис. 6. д) биметаллическими пластинками - для непосредственного отсчета показаний термометров.

Диапазон измерения биметаллических термометров лежит в интервале от -50 до $+600$ °С. причем от 500 до 600 °С термометр можно использовать только кратковременно. Погрешность измерения составляет $1...3$ % от диапазона измерения. Градуировочная характеристика близка к линейной. Однако чувствительные элементы термометров не взаимозаменяемы, и приборы требуют индивидуальной градуировки. Она может осуществляться в термостатах путем сравнения с показаниями соответствующего образцового средства измерения.

Дилатометрические термометры не получили распространения как самостоятельные приборы, но широко используются в качестве сигнализаторов достижения той или иной температуры, а также как температурные реле при автоматическом регулировании. Для этого они снабжаются дополнительными устройствами (различными контактными группами).

14.5. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего тела в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. Манометрические термометры разделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные) в зависимости от агрегатного состояния рабочего тела.

На рисунке 14.4 приведена схема манометрического термометра.

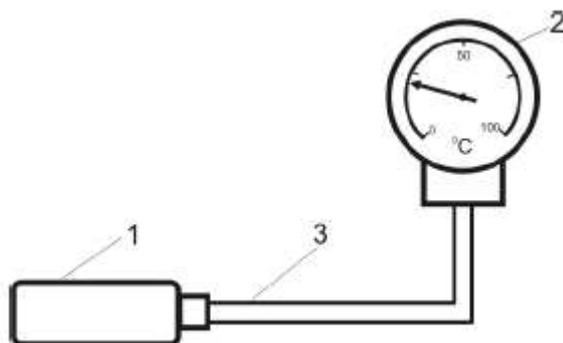


Рисунок 14.4 – Конструкция манометрического термометра

Термометр состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометрической части 3. Вся система заполнена рабочим веществом. Термобаллон погружается в среду, в которой необходимо измерить температуру. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне происходит изменение давления в замкнутой системе. Изменение давления передается на манометрическую часть, представляющую собой манометр с трубчатой пружиной.

Манометры с трубчатой пружиной изготавливаются на давление 1000 МПа. Диапазон температур от -150 до 600 °С. Диапазон измерения определяется наполнителем. При использовании специальных наполнителей верхний предел измерений составляет 1000 °С.

Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Размеры термобаллонов зависят от задач измерения. Диаметр термобаллона изменяется в пределах 5...30 мм, а длина - в пределах 60...500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической трубкой, изготовлен из меди или стали и имеет внутренний диаметр 0,1...0,5 мм. Максимальная длина капилляра 60 м. Капилляры из меди дополнительно помещены в стальную оболочку для защиты от деформации при монтаже и эксплуатации.

В зависимости от применяемого рабочего вещества манометрические термометры делятся:

- на газонаполненные (газовые), в которых система заполнена газом;
- жидконаполненные (жидкостные), в которых система заполнена жидкостью;
- конденсационные (парожидкостные), в которых термобаллон частично заполнен легкокипящей жидкостью, а остальное пространство системы заполнено парами этой жидкости.

Показывающие приборы могут иметь дополнительные устройства для сигнализации и для передачи аналогового пневматического или электрического сигнала.

Достоинством манометрических термометров являются: возможность дистанционного измерения температуры без использования дополнительной

энергии, сравнительная простота конструкции, возможность автоматической записи показаний, взрывобезопасность, нечувствительность к внешним магнитным полям.

К недостаткам относятся: относительно невысокая точность измерения, трудность ремонта при разгерметизации измерительной системы, низкая механическая прочность капилляра, небольшое расстояние дистанционной передачи показаний, значительная инерционность.

14.6. Терморезисторы (термометры сопротивления)

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

$$R_t = f(t).$$

Проводимость материала зависит от изменений температуры, и в сравнительно узком диапазоне она может быть выражена при помощи температурного коэффициента сопротивления (ТКС) α .

$$R = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)],$$

где R_0 – удельное сопротивление материала при эталонной температуре t_0 (обычно равной либо 0°C , либо 25°C). В более широком диапазоне зависимость удельного сопротивления от температуры является нелинейной функцией.

В зависимости от того, возрастает или понижается электросопротивление датчика при повышении температуры, различают датчики соответственно с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) – позисторы (РТС), и отрицательным ТКС – термисторы (НТС).

Металлические датчики температуры всегда обладают положительным ТКС, полупроводниковые – как положительным, так и отрицательным, в зависимости от состава.

Достоинствами термометров сопротивления являются:

- высокая точность измерения температуры;
- возможность выпуска измерительных приборов к термометрам сопротивления на любой температурный интервал;
- возможность присоединения нескольких термометров сопротивления к одному измерительному прибору.

К недостаткам можно отнести потребность в постоянном источнике тока.

Терморезисторы в целом можно классифицировать на:

- Низкотемпературного класса (рабочая температура ниже 170 К);
- Среднетемпературного класса (рабочая температура от 170 К до 510 К);
- Высокотемпературного класса (рабочая температура от 570 К и выше);

Отдельный класс высокотемпературных (рабочая температура от 900 К до 1300 К).

Все эти элементы, как термисторы, так и позисторы, могут работать при разнообразных климатических внешних условиях и при существенных физических внешних и токовых нагрузках. Однако в жестких термоциклических режимах, со временем меняются их исходные термоэлектрические характеристики, как-то номинальное сопротивление при комнатной температуре и температурный коэффициент сопротивления.

К проводникам термопреобразователя сопротивления предъявляется ряд требований:

- стабильность градуировочной характеристики:
- воспроизводимость результатов измерения, обеспечивающая взаимозаменяемость термопреобразователей:
- нечувствительность к малым примесям:
- линейность функции $R = f(t)$;
- высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления:
- большое удельное сопротивление:
- невысокая стоимость материалов.

В большей степени указанным требованиям соответствуют чистые металлы. При снятии механических напряжений в металле путем отжига эти характеристики достигают максимального значения.

14.6.1. Металлические терморезисторы

Достоинством металлических терморезисторов является их взаимозаменяемость, т. е. возможность работы с одним и тем же измерительным прибором, без подгонки шкалы, с разными термопреобразователями одной градуировки.

Основным условием взаимозаменяемости термопреобразователей сопротивлений при их эксплуатации является равенство сопротивлений термопреобразователей при каждой заданной температуре в пределах установленных допусков.

Взаимозаменяемость термопреобразователей сопротивлений достигается тем, что их изготавливают из металла одинаковой чистоты, что проверяется измерением соотношения R_0 и R_{100} - сопротивлений при температуре 0 и 100 °С.

Металлические терморезисторы бывают проволочными и тонкопленочными.

Тонкопленочные терморезисторы, изготавливают из тонких слоев платины или ее сплавов, нанесенных на подходящую подложку, например, на кремниевую микромембрану. Проводники часто формируются в виде серпантинной структуры для получения высокого отношения длины к ширине

Проволочные терморезисторы, в которых платиновая проволока намотана внутри керамической трубочки и прикреплена к ней при помощи высокотемпературного клея. Такая конструкция позволяет изготавливать датчики, обладающие очень высокой стабильностью.

Из чистых металлов наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления являются платина, медь, никель.

Сопротивление при 0°C в большинстве случаев выбирается равным 100 Ом. Такие измерительные резисторы обозначают Pt-100 или Ni-100. Употребительны также стандартно изготавливаемые сопротивления в 500 Ом и 1 кОм.

Платиновые термопреобразователи сопротивления применяют для измерения температуры в диапазоне -260-+750 °C.

Этот благородный металл даже при высоких температурах в окислительной среде не изменяет своих физических и химических свойств. Температурный коэффициент сопротивления в диапазоне 0...100°C имеет приблизительно $1/273 \text{ K}^{-1}$, удельное сопротивление при 20 °C равняется 0,105 Ом мм²/м, интервал температур достигает -260... ..+ 1300 °C.

Платина является наилучшим материалом, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью. химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно высокий температурный коэффициент. высокое удельное сопротивление. Недостатком является нелинейность функции $R = f(t)$ и высокая стоимость.

Температурная зависимость сопротивления платины в диапазоне 0...650 °C описывается уравнением

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2)$$

где R_T, R_0 – сопротивления преобразователя при температуре T°C и 0 °C; A и B – постоянные коэффициенты (для платинового провода, который применяется в промышленных термопреобразователях температуры[^]

$$A = 3,9702 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}; B = -5,8893 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$$

В интервале температур -250...0 °C зависимость сопротивления платины от температуры имеет вид:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + C(T - 100)^3)$$

где $C = -4,356 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1}$ – постоянный коэффициент.

В интервале температур от -200 до 650 °C приведенные зависимости являются точной аппроксимацией функции преобразования платиновых преобразователей температуры, в результате чего их используют в качестве эталонных для воссоздания Международной температурной шкалы.

Преимуществами платиновых термопреобразователей сопротивлений являются:

- большой температурный коэффициент электрического сопротивления;
- высокое удельное сопротивление;
- устойчивость к окислительной (воздушной) среде;

- способность длительное время сохранять свои характеристики.

К недостаткам можно отнести:

- распыление платины при температуре близкой к 1000 °С,
- достаточно высокая загрязняемость платины при высоких температурах парами металлов (особенно кремния и железа),
- сравнительно невысокая химическая стойкость в восстановительной среде, в результате чего она становится хрупкой, теряет стабильность характеристик.

Поэтому, исходя из экономических соображений и механической прочности чувствительного элемента, выполненного из тонкой платиновой проволоки, верхний предел измерения температуры платиновыми термопреобразователями ограничивают 750 °С.

Медные термопреобразователи сопротивлений применяют для измерения температуры в пределах от -50 до +180 °С.

Достоинством меди является ее дешевизна и легкость обработки.

Недостаток меди – небольшое удельное сопротивление и интенсивное окисление при невысоких температурах, поэтому терморезисторы из меди применяются в указанном, сравнительно узком, диапазоне температур в средах с низкой влажностью и при отсутствии агрессивных газов.

Температурный коэффициент сопротивления меди $\alpha_T = 1/234,7 \text{ K}^{-1}$, зависимость электрического сопротивления от температуры – линейная:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_T T)$$

Термопреобразователи с чувствительными элементами, изготовленными из медной проволоки диаметром 0,1 мм, изолированной эмалью, могут быть использованы для длительного измерения температуры не выше 100 °С, а из медной проволоки с кремнийорганической или винилфлексовой изоляцией – до 180 °С.

Никель – химически стойкий материал даже при высоких температурах, но имеет сложную зависимость сопротивления от температуры и невысокую ее воспроизводимость. Температурный коэффициент сопротивления никеля $\alpha_T = 1/158 \text{ K}^{-1}$ В интервале температур (-50...+180)°С температурная зависимость сопротивления такова:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 + CT^3)$$

где $A = 0,00547 \text{ K}^{-1}$; $B = 0,639 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; $C = 0,69 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$

Другие тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден, тантал и ниобий – имеют ограниченное применение из-за их охрупчивания при высоких температурах.

14.6.2. Полупроводниковые позисторы

Обычно позисторы изготавливают на основе керамики из титаната бария. Этот материал имеет удельное сопротивление при комнатной температуре

($10^{10}..10^{12}$) Ом×см, что значительно превышает удельное сопротивление полупроводников. Прибавка к составу керамики из титаната бария добавок редкоземельных материалов (лантана, церия и др.) или других элементов (ниобия, тантала, сурьмы, висмута) позволяет уменьшить удельное сопротивление до (10...100) Ом×см, что соответствует удельному сопротивлению полупроводниковых материалов. При температурах, превышающих точку Кюри композиционных материалов, их ферроэлектрические свойства меняются очень быстро, что приводит к значительному увеличению сопротивления, иногда на несколько порядков.

Для полупроводниковых термисторов очень сложно подобрать математическую аппроксимацию, поэтому для них в документации обычно приводятся следующие характеристики:

1. Сопротивление при нулевой приложенной мощности, R₂₅. При этом значении влияние эффекта саморазогрева незначительно.

2. Температура перехода, начиная с которой начинается быстрое изменение сопротивления. Она приблизительно совпадает с точкой Кюри материала. Значения температуры перехода обычно лежат в интервале – 30...+160*С

3. Температурный коэффициент сопротивления

Этот коэффициент сильно зависит от температуры и часто определяется в точке с максимальным значением.

14.6.3. Термисторы

Термисторы изготавливаются из порошков окислов Mn, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn, Co. После тепловой обработки и старения термисторы металлизуются на поверхности, создаются сопротивления, напаиваются металлические выводы, и вся конструкция фиксируется пластмассой или стеклом. При температуре 20 °С сопротивление термисторов составляет от нескольких кОм до приблизительно 40 МОм.

Возможность создания терморезисторов очень малых размеров позволяет уменьшить влияние термопреобразователя на температурное поле исследуемого объекта, улучшить динамические характеристики процесса измерения. Границы стабильной работы полупроводниковых термисторов находятся в диапазоне (-100 ... +400) °С.

Кроме малых габаритов полупроводниковые термисторы отличаются от металлических термопреобразователей высокой чувствительностью (высоким ТКС). Однако, температурный коэффициент сопротивления термистора не является постоянной величиной, он уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры.

При проведении прецизионных измерений или при работе в широком температурном диапазоне нельзя напрямую использовать характеристики термисторов, приведенные в документации на них, поскольку типовые допуски на номинальные значения серийно выпускаемых изделий при температуре 25°С составляют порядка ±20%. Поэтому для достижения

высокой точности измерений термисторы необходимо индивидуально калибровать в широком температурном диапазоне.

Для описания функции преобразования термисторов были предложены несколько математических моделей. Все существующие модели термисторов построены на экспериментально доказанном факте, что логарифм сопротивления термистора связан с его абсолютной температурой следующей полиномиальной зависимостью:

$$\ln S = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}.$$

Простая модель

В относительно узком температурном диапазоне и при некоторой потере точности можно отбросить два последних члена уравнения:

$$\ln S \cong A + \frac{\beta_m}{T},$$

где A – константа, а D - характеристическая температура материала (в Кельвинах). Если известна величина сопротивления термистора R_0 при калибровочной температуре T_0 , можно записать зависимость сопротивления от температуры в следующем виде:

$$S = S_0 e^{\beta_m(1/T - 1/T_0)}.$$

Очевидное достоинство этой модели - необходимость проведения калибровки термистора только в одной точке. Однако здесь предполагается знание коэффициента β . Если он неизвестен, приходится проводить вторую калибровку для нахождения его значения:

$$\beta_m = \frac{\ln(S_1 / S_0)}{(1/T_1 - 1/T_0)},$$

где T_0 и S_0 и T_1 , и S_1 , - две пары температур и сопротивлений, полученных в двух калибровочных точках, находящихся на кривой, соответствующей уравнению. Считается, что значение β не зависит от температуры, но оно может меняться от изделия к изделию в пределах производственных допусков, которые обычно составляют $\pm 1\%$. Температура термистора определяется по измеренному сопротивлению R при помощи следующего выражения:

$$T = \left(\frac{1}{T_0} + \frac{\ln(S/S_0)}{\beta_m} \right)^{-1}.$$

Погрешность аппроксимации, представленной выражением (16.20), мала в окрестности температуры калибровки, но значительно увеличивается при расширении рабочего диапазона (рис. 16.7).

Коэффициент β отвечает за кривизну характеристики термистора, но не является параметром, напрямую соответствующим его чувствительности, которая определяется температурным коэффициентом α . Коэффициент α может быть найден при дифференцировании уравнения:

$$\alpha_r = \frac{1}{S} \frac{dS}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}.$$

Из уравнения следует, что чувствительность термистора зависит как от β , так и от температуры. Термистор обладает лучшей чувствительностью на низких температурах, тогда как при увеличении температуры его чувствительность резко падает. Уравнение также показывает, насколько меняется сопротивление S при изменении температуры на один градус.

При использовании термистора в качестве датчика абсолютной температуры предполагается, что при прохождении через него электрического тока, его собственная температура не изменится, что означает, что он не внесет в систему значительных тепловых возмущений, способных повлиять на точность измерений. В этом случае говорят, что термистор обладает «нулевой мощностью».

Для выполнения условий «нулевой мощности» необходимо, чтобы:

- термистор обладал высоким удельным сопротивлением,
- термистор и объект измерения имели хорошую тепловую связь друг с другом,
- измерения проводились при небольшом постоянном напряжении, подаваемом в течение короткого интервала времени.

14.7. Термопары (термоэлектрические термометры)

14.7.1. Термоэлектрические явления

Действие приборов основано на использовании термоэлектрического эффекта, открытого Зеебеком в 1821 г. В замкнутой цепи, состоящей из двух или более разнородных материалов, возникает электрический ток, если спаи имеют разные температуры (рисунок 14.5). Проводники A и B называют термоэлектродами. Рабочий спай имеет температуру t и помещается в измеряемую среду. Свободный спай имеет постоянную температуру t_0 .

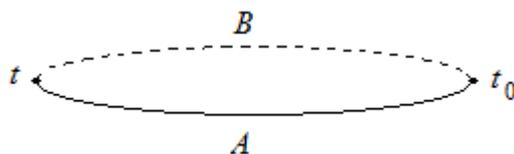


Рисунок 14.5 – Схема термоэлектрического термометра

Различные металлы обладают разной работой выхода электронов, поэтому в их спае возникает контактная разность потенциалов. Наблюдается также диффузия свободных электронов из более нагретых частей проводника

в менее нагретые с большей интенсивностью, чем в обратном направлении. Поэтому при размыкании цепи термоэлектрического преобразователя может быть измерена термоЭДС, величина которой зависит от природы проводников и разности температур спаев:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Для конкретной пары материалов значение возникающей термоЭДС является функцией разницы температуры, а при постоянной температуре $t_0 = \text{Const}$ – функцией температуры t .

Эта функция для различных термоэлектрических преобразователей имеет нелинейный характер и устанавливается экспериментально путем градуировки.

Для измерения термоЭДС термоэлектрического преобразователя в разрыв свободного спаива включается измерительный прибор (рисунок 14.5).

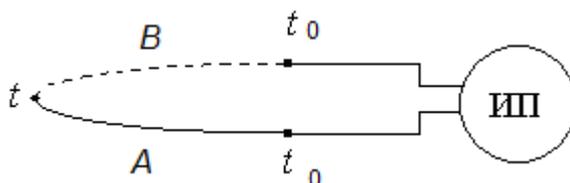


Рисунок 14.5 – Схема включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя

Таким образом, термопары являются пассивными (генерирующими) датчиками – они сами вырабатывают напряжение в ответ на изменение температуры и не требуют для этого внешнего источника питания.

Термопары относятся к классу относительных датчиков, поскольку их выходное напряжение определяется разностью температур между 2-мя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения. При измерении температуры один ее спай служит эталоном, и его температуру необходимо определять при помощи отдельного датчика абсолютной температуры, (например, термистора, РДТ и т.д.) или его надо поместить в материал, находящийся в физическом состоянии, температура которого точно известна.

Чтобы определить измеряемую температуру среды с помощью термоэлектрического преобразователя, необходимо выполнить следующие операции:

- измерить термоЭДС в цепи преобразователя;
- определить температуру свободных концов;
- в измеряемую величину термоЭДС ввести поправку на температуру свободных концов;
- по известной зависимости термоЭДС от температуры определить измеряемую температуру среды.

Для сравнения термоэлектрических свойств материалов создана платиновая нормаль (таблица 14.1), относительно которой определяются термоЭДС других материалов. В справочной литературе приводят значение

термоЭДС, которые развиваются наиболее распространенными термоэлектродными материалами относительно платины при температуре рабочего спая $T - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре свободных концов $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 14.1 – Платиновая нормаль

Металл	ТермоЭДС, мВ	Металл	ТермоЭДС, мВ	Металл	ТермоЭДС, мВ
Копель	-4,0	Олово	+0,44	Манганин	+0,76
Константан	-3,4	Иридий	+0,65	Золото	+0,78
Никель	-1,48	Родий	+0,70	Вольфрам	+1,12
Кобальт	-1,33	Серебро	+0,74	Железо	+1,98
Платина	0	Цинк	+0,76	Хромель	+2,96
Платино-родий (90% Pt)	+0,64	Медь	+0,76	Никель-хром (90% Ni)	+2,81

14.7.2. Типы термопар:

Тип T: Cu (+) и константан (-). Такие термопары устойчивы к коррозии (поэтому могут применяться для работы во влажной атмосфере) и пригодны для измерения отрицательных температур. При работе на воздухе в агрессивной среде их верхний предел рабочего диапазона ограничен $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($700\text{ }^{\circ}\text{F}$), что связано с окислением медного элемента. В других окружающих условиях термопары типа T могут использоваться при более высоких температурах.

Тип J: Fe (+) и константан (-). Термопары этого типа подходят для работы в вакууме, а также в различных средах: и инертных, и окислительных, и восстановительных. Их рабочий температурный диапазон лежит в интервале $0\text{...}760\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре около $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается быстрый процесс окисления железных термоэлементов. Если требуется, чтобы термопары работали длительное время в условиях высоких температур, для их изготовления необходимо применять провода с большим поперечным сечением. Термопары типа J не рекомендуется использовать для измерения температур ниже точки замерзания воды из-за их хрупкости и подверженности ржавлению. В этом температурном диапазоне лучше работают термоэлементы типа T.

Тип E: 10% Ni/Cr (+) и константан (-). Эти термопары рекомендуется использовать в температурном диапазоне $-200\text{...}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в окислительных или инертных атмосферах. В восстановительной атмосфере и в вакууме они имеют те же ограничения, что и термопары типа K. Термопары типа E могут применяться для измерения отрицательных температур, благодаря тому, что они не подвержены коррозии при работе в атмосфере с повышенным содержанием влаги. Они способны вырабатывать наибольшую среди всех известных типов термопар э.д.с., поэтому термоэлементы типа E являются самыми популярными (см. рис. 3.36 главы 3)

Тип К: 10% Ni/Cr (+) и 5% Ni/Al/Si (-). Такие термопары применяются для работы в окислительной и полностью инертных средах для измерения температур в диапазоне $-200...1260^{\circ}\text{C}$. Благодаря своей устойчивости к окислению их часто используют при температурах выше 540°C . Однако термопары типа К нельзя применять в восстановительных и сернистых атмосферах, а также в вакууме.

Тип R и S: Pt/Rh (+) и Pt (-). Эти термопары предназначены для непрерывной работы в окислительной и инертной среде в температурном диапазоне $0...1480^{\circ}\text{C}$

Тип В: Pt/Rh (+) и 6% Pt/Rh (-). Термопары типа В подходят для непрерывной работы в окислительной и инертной атмосфере в температурном диапазоне $870...1700^{\circ}\text{C}$. Их также можно использовать для проведения кратковременных измерений в вакууме. Такие термопары не рекомендуется применять в восстановительной среде, содержащей пары металлов и неметаллов. Их нельзя вставлять в металлические защитные корпуса или чехлы.

14.7.3. Законы термоэлектричества

Для практического использования термопар необходимо знать три основных закона, устанавливающих правила их подключения. Следует подчеркнуть, что интерфейсные электронные схемы всегда должны подсоединяться к двум идентичным проводникам. Эти проводники, как правило, формируют одно из плечей термопарного контура, используемого для подключения измерительного устройства.

Закон 1. Явление термоэлектричества характерно только для неоднородных электрических цепей.

Закон 2. Алгебраическая сумма всех термо э.д.с. цепи, состоящей из любого количества термопар (соединений разных материалов), будет всегда равна нулю, если все соединения находятся при одинаковой температуре.

Это значит, что в любое плечо термоэлектрического контура можно внести дополнительный материал С, не боясь изменить результирующее напряжение К, при условии, что оба новых соединения будут иметь одинаковую температуру (рисунок 14.6). Здесь нет никаких ограничений на количество внесенных проводников, необходимо только поддерживать одинаковую температуру в местах их подключения.

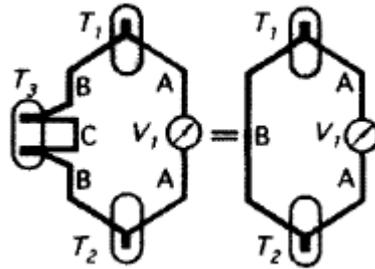


Рисунок 14.6 – Иллюстрация второго закона термоэлектричества

При этом метод соединения не будет влиять на точность термопар. Из закона 2 вытекает правило введения дополнительных материалов (рисунок 14.7): Если известны термо э.д.с V_1 и V_2 двух проводников (B и C) при их подсоединении к эталонному проводнику A, результирующее напряжение при непосредственном контакте проводников B и C будет равно алгебраической сумме V_3 термо э.д.с V_1 и V_2 .

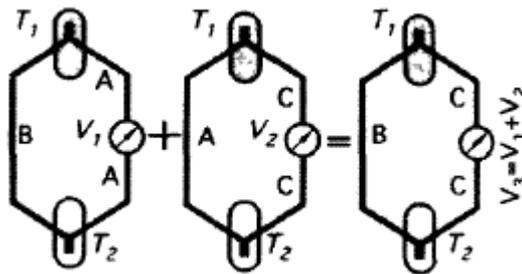


Рисунок 14.7 – Иллюстрация правила введения дополнительных материалов

Закон 3. Если два соединения разных материалов, находящихся при температурах T_1 , и T_2 , вырабатывают термо э.д.с V_2 , а при температурах T_2 и T_3 результирующая термо э.д.с. равна V_1 то при температурах T_1 и T_3 выходное напряжение V_3 определяется суммой двух термо э.д.с V_1 и V_2 (рисунок 14.8).

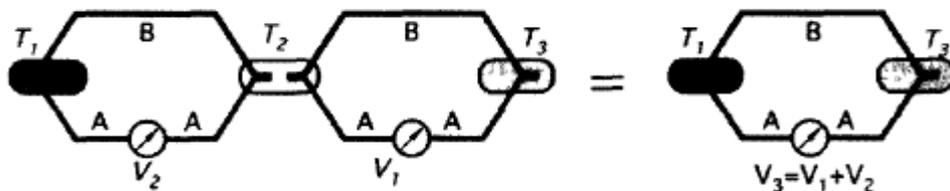


Рисунок 14.8 – Иллюстрация третьего закона термоэлектричества

Этот закон иногда называется законом промежуточных температур. Он позволяет калибровать термопары в одном температурном диапазоне, а использовать в другом. Из этого закона также следует, что в термоэлектрическую цепь могут быть внесены дополнительные провода без изменения ее точностных характеристик.

14.7.4. Соединение термопар

Для измерения разности температур в двух точках используют дифференциальные термоэлектрические преобразователи (рисунок 14.9а).

Последовательно соединяя несколько термоэлектрических преобразователей, можно получить термобатарею, генерирующую большую термоЭДС (рисунок 14.9б).

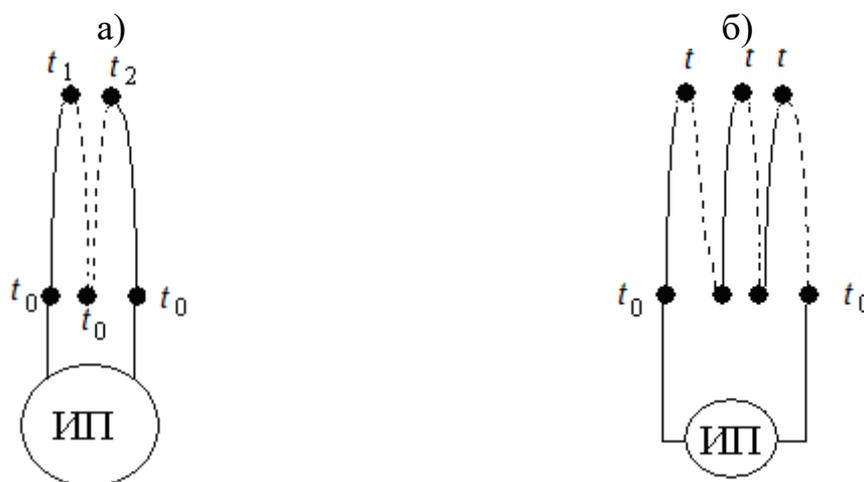


Рисунок 14.9 – Соединение термопар: а – дифференциальное; б – последовательное

14.7.5. Погрешности измерения температуры термоэлектрическими термометрами

Источниками погрешностей при измерении температуры термоэлектрическими термометрами являются:

Плохой контакт в месте спая или раскат бровка. Плохой контакт возникает при неточной установке термоэлектрического термометра, когда спай термопары, например, при измерении температуры твердого (пористого) тела, попадает в воздушную полость. Вследствие этого термометр фиксирует не температуру твердого тела, а температуру газа внутри пор.

Раскалибровка термопары (возникновение несоответствия между рабочей характеристикой термопары и калибровочной зависимостью) возникает обычно при физико-химических изменениях в материале термоэлектродов под влиянием высоких температур.

Шунтирование термопары возникает тогда, когда электрическое сопротивление оболочек термоэлектродов снижается вследствие воздействия высоких температур. Это эквивалентно образованию нового спая с отличной от настоящего спая температурой.

14.7.6. Удлинительные термоэлектроды

Удлинительные термоэлектроды. Свободные концы термопары должны находиться при постоянной температуре (рисунок 14.10). Однако не всегда возможно сделать термоэлектроды термопары настолько длинными и гибкими, чтобы ее свободные концы размещались в достаточном удалении от

рабочего спая. Кроме того, при использовании благородных металлов делать длинные термоэлектроды экономически невыгодно, поэтому приходится применять провода из другого материала.

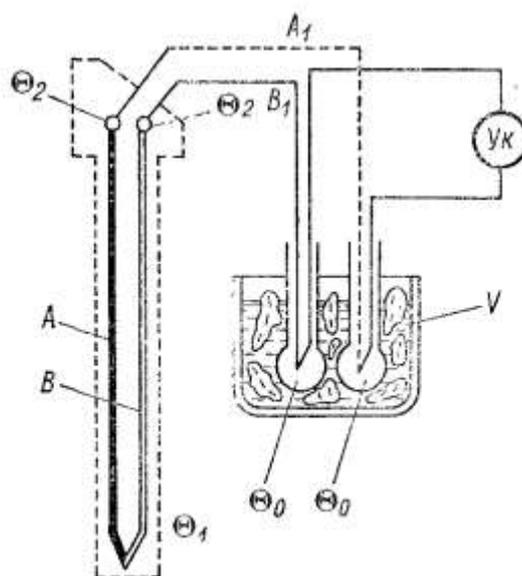


Рисунок 14.10 – Использование удлинительных термоэлектродов

Соединительные провода A_1 и B_1 (рисунок 14.108), идущие от зажимов в головке термопары до сосуда объемом K , температуру в котором желательно поддерживать постоянной, называют удлинительными термоэлектродами. Далее для соединения с измерительным прибором можно использовать обычные провода.

Чтобы при включении удлинительных термоэлектродов из материалов, отличных от материалов основных термоэлектродов, не изменилась термо-ЭДС термопары, необходимо выполнить два условия. Первое – места присоединения удлинительных термоэлектродов к основным термоэлектродам в головке термопары должны иметь одинаковую температуру. И второе – удлинительные термоэлектроды должны быть термоэлектрически идентичны основной термопаре, т. е. иметь ту же термо-ЭДС в диапазоне возможных температур места соединения термоэлектродов в головке термопары (примерно в диапазоне от 0 до 200 °С).

Для термопары платинородий – платина применяются удлинительные термоэлектроды из меди и сплава ТП, образующие термопару, термоидентичную термопаре платинородий – платина в пределах до 1э0 С. Для термопары хромель – алюмель удлинительные термоэлектроды изготавливаются из меди и константана. Для термопары хромель – копель удлинительными являются основные термоэлектроды, но выполненные в виде гибких проводов.

При неправильном подключении удлинительных термоэлектродов возникает весьма существенная погрешность.

14.7.7. Измерительные цепи.

В прошлом холодные спаи термопар опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной 0°C (отсюда появилось название «холодные» спаи). Но это очень неудобно, а для многих практических схем и вовсе невозможно. Простое решение этой проблемы вытекает из второго и третьего законов термоэлектричества. Холодный спай может находиться при любой температуре, даже при температуре окружающей среды, единственное условие: значение этой температуры должно быть известно. Поэтому часто для измерения температуры холодного спаи используется дополнительный детектор (например, терморезистивный или полупроводниковый) без компенсационных цепей.

Простейшая измерительная цепь термометра с термоэлектрическим преобразователем изображена на рисунке 14.11

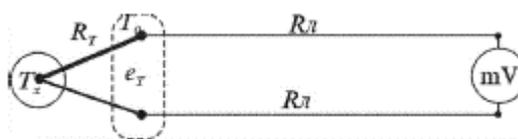


Рисунок 14.11 – Простейшая измерительная цепь для термопары

При условии, что температура T_0 свободных концов термопары будет неизменной и сопротивление всей измерительной цепи также неизменно, показания милливольтметра будут определяться значениями измеряемой температуры T_x .

Для уменьшения зависимости показаний прибора от сопротивления измерительной цепи пытаются соблюсти условие

$$R_{mv} \gg R_T + 2R_{\text{л}}$$

Если милливольтметр является составной частью термометра и его шкала проградуирована в единицах измеряемой температуры, то нелинейность функции преобразования термопреобразователя может быть учтена в шкале прибора, которая соответственно также будет нелинейной.

Обязательным условием, которого необходимо придерживаться при измерении такими приборами, является обеспечение сопротивления $R_{\text{сум}}$ всей измерительной цепи прибора, его градуировочному значению, то есть такому значению $R_{\text{град}}$, при котором градуировался прибор. Для подгонки сопротивления цепи используется дополнительный резистор $R_{\text{под}}$ (рисунок 14.12).

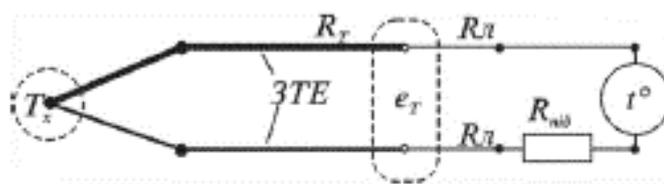


Рисунок 14.12 – Измерительная цепь термопары с дополнительным резистором

В этом случае сопротивление внешней цепи не будет причиной погрешности. Возникновение погрешностей будет определяться лишь отклонениям суммарного сопротивления от градуировочного значения и вызываться, например, изменением сопротивления линии в результате изменения температуры окружающей среды.

В промышленных условиях для введения коррекции от изменения температуры свободных концов на показания прибора обычно используют устройства автоматического введения поправок. Таким устройством может быть мостовая цепь, которая состоит из температурнезависимых манганиновых сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 и сопротивления R_4 из меди или никеля, которое изменяет свое сопротивление в зависимости от температуры (рисунок 14.13).

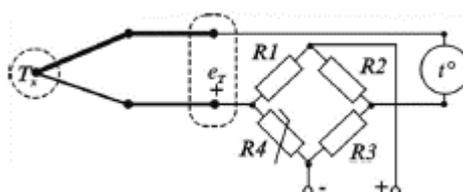


Рисунок 14.13 – Коррекция показаний термопары с помощью мостовой схемы

Если температура термозависимого резистора, как и температура свободных концов термопары, будет равняться, например, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то мост должен находиться в равновесии. При отклонении этой температуры от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызванное этим изменением температуры изменение термоЭДС термопары будет компенсироваться напряжением разбалансировки моста, вызванным изменением сопротивления R_4 .

14.8. Индикаторы температуры

14.8.1. Термокраски

Они представляют собой вещества, обладающие хорошей кроющей способностью и адгезией, способные при определенных температурах претерпевать обратимые и необратимые химические превращения с резким изменением окраски. Эти свойства термокрасок используются для исследования температурных полей в зоне воздействия режущего

инструмента на деталь и в отходящей стружке, а также для исследования температурных полей во вращающихся деталях быстроходных высокотемпературных двигателей.

Способность изменять цвет в зависимости от температуры свойственна многим веществам. В качестве термочернил применяются такие вещества, которые в критических точках резко меняют цвет на контрастный: розовый на голубой, голубой на коричневый, светло-зеленый на фиолетовый и т. п.

Цветовые преобразования, происходящие при повышении температуры, связаны с отдачей конституционной влаги, углекислого газа, аммиака и др. Термочернила включают в состав метилоранж, фенолфталеин, молибденовокислый аммоний, нафталин, щавелевую кислоту и другие компоненты.

14.8.2. Конуса Зегера

В основном применяются для определения температур в обжиговых печах. Измерительные элементы представляют собой усеченные высокие трехгранные пирамиды (название конус не строго) из керамической массы с различными температурами начала размягчения. Выдерживание точного состава шихты (окислы калия, кальция, натрия, магния, борная кислота и др.) для конусов, различаемых по номерам, позволяя! с достаточной точностью определять температуру в печи.

Обычно в печь вставляют три – пять конусов, из которых средний по номеру соответствует измеряемой температуре. При соблюдении режима легкоплавкие конуса расплавляются, более тугоплавкие остаются без видимых изменений, у среднего вершина конуса в процессе размягчения загибается к основанию.

Разработанная рецептура (более чем для 64 конусов) позволяет с шагом, не превышающим 50 град перекрыть диапазон температур от 600 до 2000° С.

Плавкие вставки подобны конусам Зегера. В исследуемом теле высверливают небольшие по диаметру и глубине отверстия с таким расчетом, чтобы жидкий материал в них при рабочих условиях не удерживался. Отверстия заполняют обычно металлическими сплавами с определенными температурами плавления. Для каждой точки необходимо заполнить несколько отверстий сплавами, температура плавления которых перекрывает ожидаемую.

В тех случаях, когда плавление не регистрируется по сплошной вставке, в отверстия зачеканивают трубочки из соответствующих сплавов. Плавление трубчатой вставки фиксируется при любых условиях. При низких температурах применяют восковые сплавы. Область применения плавких вставок примерно та же, что и термочернил.

14.8.3. Точки Кюри.

Шкала реперных точек составлена по температурам переходов из одного агрегатного состояния в другое, что может быть зафиксировано по потреблению или выделению скрытой теплоты превращения. Аналогичные фазовые переходы присущи ферромагнетикам, антиферромагнетикам и сегнетоэлектрикам. Точки фазового перехода были впервые изучены М. Кюри и П. Кюри и носят их имя.

В точках Кюри интенсивность теплового движения оказывается достаточной для разрушения спонтанной намагниченности тела, вследствие чего ферромагнетик обращается в парамагнетик. Это явление может быть зафиксировано с большой точностью и практически не зависит от других параметров и воздействий окружающей среды (давление, освещенность, ускорение и др.).

Сплавы никеля, кобальта и хрома при вариации компонент изменяют температуру точки Кюри в пределах от 370° С (чистый никель) до 1130° С (чистый кобальт). Системы с использованием точки Кюри применяют для автоматического регулирования температуры в печах. Изменение магнитных свойств сердечников приводит к нарушению равновесия в мосте переменного тока с индуктивностями. Ток небаланса направляется к элементам автоматического регулирования режима печи.

14.9. Радиационная пирометрия

Все ранее рассмотренные первичные измерительные преобразователи относятся к термометрическим преобразователям, т. е. к преобразователям, основанным на прямом контакте с телом, температура которого измеряется. Радиационная пирометрия представляет собой науку об измерениях температуры тела без непосредственного контакта с ним, т. е. с использованием энергии излучения нагретого тела, ее регистрации и отображения в единицах температуры.

Измерение температуры по излучению тела основывается на использовании основных законов излучения, которые устанавливают связь между температурой излучателя (исследуемого объекта) и его спектральным свечением, то есть количеством энергии, которая излучается за единицу времени из единицы поверхности исследуемого объекта, и которая содержится в определенном диапазоне длин волн. В зависимости от спектральной чувствительности устройства измерения температуры по излучению разделяют на радиационные, квазимонохроматические и спектральные излучения.

Пирометр – это первичный измерительный преобразователь температуры, который определяет энергию излучения тела. По своей природе он является дистанционным (бесконтактным) первичным измерительным преобразователем.

Радиационные пирометры являются самыми простыми по строению. Правда, они наименее точные среди приборов, которые измеряют температуру по излучению.

В общем случае пирометр представляет собой целую систему, содержащую в себе: 1) совокупность оптических линз для фокусировки энергии излучения на преобразующем элементе; 2) преобразующий элемент для восприятия энергии излучения; 3) электронные схемы для сопряжения преобразующего элемента с последующими блоками системы.

Все типы пирометров основаны на излучении тепла телом, температура которого измеряется. Принцип работы прибора показан на рисунке 14.14, где сам пирометр изображен в виде ящика с отверстием, через которое энергия излучения проходит от тела к преобразующему элементу.

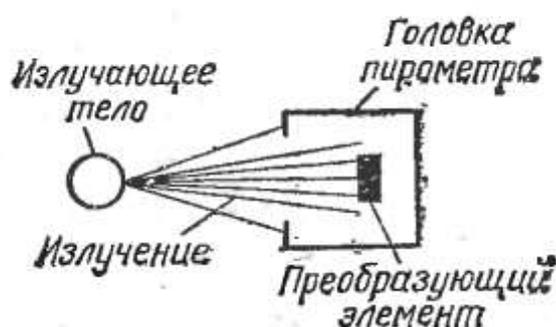


Рисунок 14.14 – Принцип работы радиационного пирометра

Количество энергии, исходящей от тела, зависит от его температуры и способности к излучению. Последняя для данного тела является неизменной и определяется материалом тела.

На первый взгляд, количество энергии, подаваемое в пирометр, зависит от расстояния до тела: энергия обратно пропорциональна квадрату расстояния между пирометром и телом. Другими словами, количество энергии, достигающей преобразующего элемента, уменьшается пропорционально квадрату расстояния от тела. Однако площадь поверхности тела, которую «видит» преобразующий элемент пирометра, увеличивается пропорционально квадрату расстояния до тела.

Таким образом, излучение, достигающее пирометра, не зависит от его расстояния до тела (при условии, что поверхность тела полностью заполняет область «видения» пирометра). Отсюда следует, что при известной способности тела к излучению пирометр непосредственно регистрирует температуру тела.

Преобразующий элемент устройства может быть выполнен в форме любого из ранее рассмотренных преобразователей для измерения температуры. Обычно в пирометрах используются для этой цели термопары, резистивные чувствительные элементы или полупроводниковые приборы.

Для измерения энергии, испускаемой нагретым телом, радиационные пирометры имеют теплоприемник 4 (рисунок 14.15), представляющий термобатарей, прикрепленную к платиновой фольге, покрытой платиновой чернью.

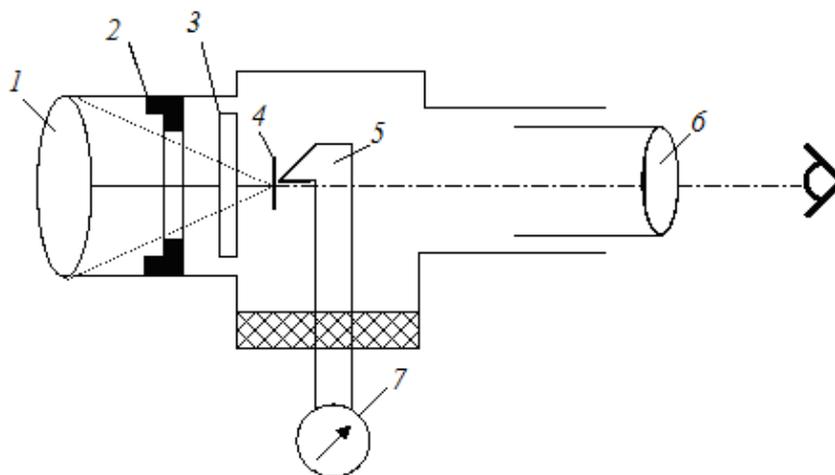


Рисунок 14.15 – Схема радиационного пирометра

С помощью оптической системы 6 пирометр наводится на нагретое тело. При этом поток электромагнитного излучения, ограниченный диафрагмой 2, фокусируется с помощью линзы 1 на теплоприемнике 4, температура которого измеряется с помощью термобатарей 5 и прибора вторичного 7. ТермоЭДС батареи измеряется милливольтметром или потенциометром. Для уменьшения интенсивности излучения, приходящего на теплоприемник, установлен серый светофильтр 3.

В квазимонохроматических (фотоэлектрических) пирометрах сравнивается яркость монохроматического излучения нагретого тела с яркостью эталонного тела – нити лампы накаливания, имеющей известную температуру (рисунок 14.16).

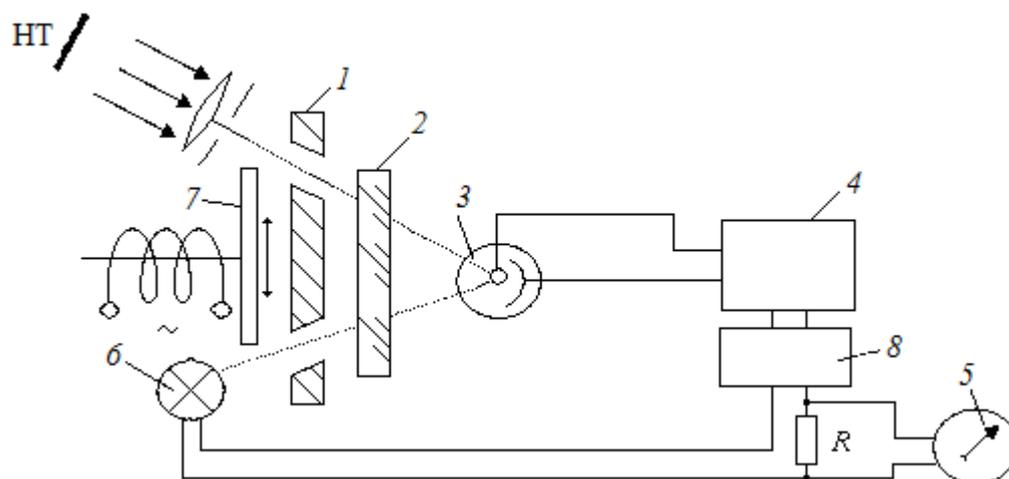


Рисунок 14.16 – Схема фотоэлектрического пирометра

Система находится в состоянии равновесия, если температура нагретого тела и температура нити лампы накаливания 6 равны. Потoki излучения, ограниченные диафрагмой 1, проходят через красный светофильтр 2 и прерываются поочередно заслонкой 7. При изменении температуры нагретого тела изменится яркость, тогда в цепи фотоэлемента 3 появится переменная составляющая фототока, усиливаемая электронным усилителем 4 и поступающая на фазочувствительный каскад силового блока 8.

В результате изменяется ток, протекающий через нить лампы накаливания, до тех пор, пока поток электромагнитной энергии от лампы накаливания не станет равным потоку электромагнитной энергии от нагретого тела. По величине тока, протекающего по нити лампы накаливания, можно оценить температуру нагретого тела. Падение напряжения на сопротивлении R измеряется с помощью автоматического потенциометра, шкала которого отградуирована в значениях яркостной температуры.

Пирометры спектрального отношения, или цветные пирометры определяют температуру по соотношению спектральных энергетических яркостей, соответствующих длинам волн $\lambda_1 = 0,66$ мкм и $\lambda_2 = 0,47$ мкм. В соответствии с законами Вина и Планка такое отношение СЭЯ однозначно зависит от температуры нагретого тела. Измеряемое излучение (рисунок 14.17) через объектив 1 и фильтры обтюратора 2 попадают на фотоэлектрический приемник 3. Обтюратор – это диск с двумя отверстиями, закрытыми красным и синим светофильтрами.

При вращении обтюратора на фотоэлектрический приемник поочередно попадает излучение соответствующей длины волны, поэтому в цепи фотоэлемента формируются импульсы фототока, пропорциональные соответствующей яркости.

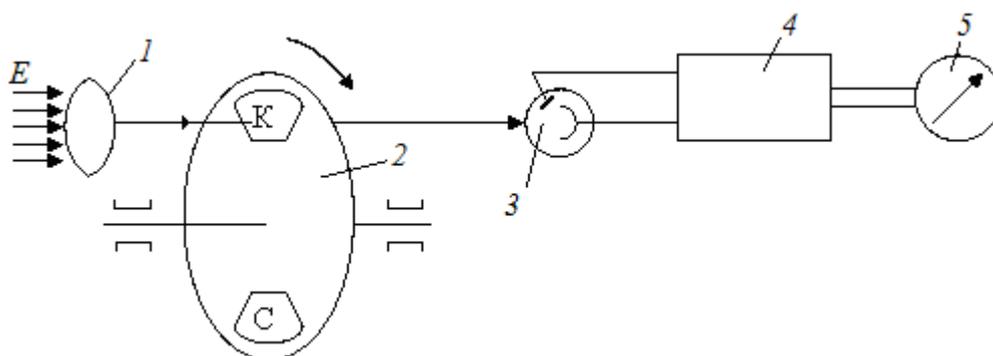


Рисунок 14.17 – Схема пирометра спектрального отношения

В результате преобразования этих сигналов электронным устройством 4 на милливольтметр 5 поступает электрический сигнал постоянного тока, сила которого зависит от соотношения спектральных энергетических яркостей излучений двух длин волн, а следовательно и от температуры нагретого тела.

Пирометры отношения измеряют температуру от 1400 до 2800 °С; основная погрешность измерения не превышает $\pm 1\%$.

15. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ

Датчики силы можно разделить на два класса: количественные и качественные. Количественные датчики измеряют силу и представляют ее значение в электрических единицах. Примерами таких датчиков являются динамометрические элементы и тензодатчики. Качественные датчики - это пороговые устройства, чья функция заключается не в количественном определении значения силы, а в детектировании превышения заданного уровня приложенной силы.

Методы измерения силы можно разделить на следующие группы:

1. Уравновешивание неизвестной силы силой тяжести тела известной массы
2. Измерение ускорения тела известной массы, к которому приложена неизвестная сила
3. Уравновешивание неизвестной силы электромагнитной силой
4. Преобразование силы в давление жидкости и измерение этого давления
5. Измерение деформации упругого элемента системы, вызванной неизвестной силой.

В современных датчиках наиболее часто применяется 5 метод, а методы 3 и 4 используются сравнительно редко.

В большинстве датчиков не происходит прямого преобразования силы в электрический сигнал. Для этого обычно требуется несколько промежуточных этапов. Поэтому, как правило, датчики силы являются составными устройствами. Например, датчик силы часто представляет собой комбинацию преобразователя сила-перемещение и детектора положения (перемещения).

Это может быть простая спиральная пружина, уменьшение длины которой, вызванное приложенной силой сжатия будет пропорционально ее коэффициенту упругости (рисунок 15.1).

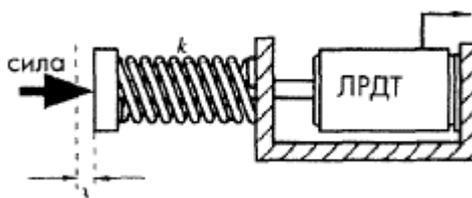


Рисунок 15.1 – Конструкция простейшего датчика силы

15.1. Виды упругих элементов и области их использования

Типичным преобразователем механического сигнала является упругий элемент, который входит практически во все датчики силы, давления и ускорения. Входной величиной упругого элемента является сила (момент) или давление, а выходной – перемещение (линейное или угловое) или деформация, выраженная в относительных или абсолютных единицах, причем под перемещением в этом случае следует понимать прогибы характерных точек упругого элемента в направлении, задаваемом, направлением действия нагрузки. Обычно это направление, совпадающее с направлением действия силы, либо перпендикулярное ему. Под деформацией понимается перемещение точек, лежащих на поверхности упругого элемента. Поэтому упругие элементы как преобразователи механического сигнала целесообразно разделять на преобразователи «сила–деформация» и «сила–перемещение» (преобразователи силы), «давление–деформация» и «давление–перемещение» (преобразователи давления), «момент–угол» и т. д. Такое деление упругих элементов целесообразно еще и потому, что «вход– выход» определяет чувствительность преобразователя, его конструктивное оформление, а также метод предыдущего и последующего преобразования.

Так, например, если выходной величиной упругого элемента является деформация, то это предполагает, как правило, использование различного рода тензорезисторных преобразователей; если перемещение, то – индуктивных, емкостных или реостатных преобразователей.

К преобразователям силы, например, относятся упругие элементы в виде

- сплошных и полых стержней,
- колец постоянного и переменного сечения,
- балок равного сечения и равного сопротивления,
- специальных стержневых упругих элементов.

К преобразователям давления относятся

- трубки Бурдона,
- мембранные коробки,
- мембраны с несимметричным центром,

- колпачки, полусферы,
- комбинированные упругие элементы.

Для таких упругих элементов как

- плоские
- и гофрированные мембраны,
- сильфоны и другие,

входной величиной может быть как сила, так и давление.

15.1.1. Преобразователи силы

Стержневые упругие элементы (рисунок 15.2).

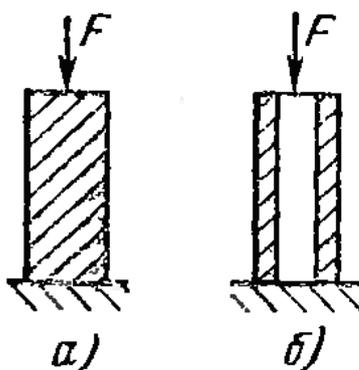


Рисунок 15.2 – Конструкции сплошного (а) и полого (б) стержневых упругих элементов

Достоинство стержневых упругих элементов заключается в простоте изготовления. Для таких элементов достаточно легко достигаются высокие классы точности выполнения геометрических размеров, чистоты обработки поверхностей. Кроме того, стержневой упругий элемент наиболее подходит для построения датчиков на высокие пределы измерения при ограниченной массе и габаритных размерах.

Стержневые упругие элементы обладают малой чувствительностью и применяются для преобразования больших усилий (свыше 10кН). Для повышения чувствительности стержневые элементы выполняются полыми. Следует, однако, отметить, что уменьшение толщины стенки таких элементов ограничено технологическими возможностями и эксплуатационными особенностями, а пределы преобразуемых усилий таких преобразовательных элементов обычно не ниже 0,5 кН.

Одним из недостатков такого упругого элемента является малая величина перемещения, поэтому их применяют только в тензорезисторных датчиках, где величина возникающей деформации оказывается вполне приемлемой. Однако в таком элементе невозможно выполнить одинаковые условия для установки преобразователей неэлектрической величины в электрическую (тензорезисторов), воспринимающих деформации разного знака (из-за разной кривизны поверхности).

Другой существенный недостаток стержневых упругих элементов – ограниченность чувствительности. Для увеличения чувствительности стержень выполняют полым, в виде цилиндра. Это, кроме увеличения чувствительности, позволяет увеличивать площадь под установку тензорезисторов и дает возможность уменьшить габаритные размеры и массу датчика. Но уменьшение толщины стенки и диаметра цилиндра ограничено практическими возможностями его изготовления. Кроме того, жесткость такого тонкостенного цилиндра делается соизмеримой с жесткостью наклеиваемого тензорезистора, которая образуется за счет клеевого слоя, изоляционной прокладки и является величиной нестабильной. Поэтому такие упругие элементы применяют в датчиках с пределами измерений более 500 Н.

Кольцевые упругие элементы (рисунок 15.3).



Рисунок 15.3 – Конструкция кольцевого упругого элемента

Такие элементы по сравнению со стержневыми имеют ряд преимуществ.

Во-первых, перемещение подвижной части упругого элемента существенно больше, чем у стержня. Поэтому такие элементы применяют в емкостных, индуктивных и других датчиках, где требуется значительное перемещение упругого элемента.

Во-вторых, кольцевые упругие элементы имеют более высокую чувствительность и поэтому их применяют для преобразования силы до 10 Н. Выполнение кольцевых элементов на высокие пределы измерения нецелесообразно, так как приводит к неоправданному увеличению размеров и массы датчика. Практически верхним пределом измерения силы кольцевых упругих элементов следует считать 5000 Н.

Шире возможности у кольцевого элемента и в части использования выходной величины. У кольца четыре зоны деформаций, в каждой из которых имеются одинаковые условия для установки тензорезисторов: деформации сжатия и растяжения, кривизна поверхностей для установки тензорезисторов примерно одинаковы.

Недостатком кольцевого элемента является то, что распределение напряжений в зонах деформаций неравномерное. Стремление получить более равномерное распределение напряжений привело к разработке кольца переменного сечения. Кроме того, кольцевые упругие элементы менее технологичны, чем стержневые. При их изготовлении труднее обеспечивать высокие классы точности и чистоты обработки. Размеры и масса датчиков с

кольцевыми элементами больше, чем со стержневыми. Однако в тех случаях, когда стержневой элемент не обеспечивает требуемой чувствительности или необходимо использовать в качестве выходной величины значительное перемещение, применение кольцевых упругих элементов оказывается весьма эффективным.

Балочные упругие элементы (рисунок 15.4).



Рисунок 15.4 – Конструкции балок равного сечения (а) и равного сопротивления (б)

По технологичности изготовления они не уступают стержневым, позволяют получить большие перемещения, а деформации сжатия и растяжения у них строго одинаковы. Однако широкое использование их ограничено двумя причинами: во-первых, большими трудностями при фиксации точки и направления приложения силы; при действии силы конец балки перемещается по дуге окружности и точка приложения силы изменяет свои координаты, что вызывает дополнительные погрешности; во-вторых, трудностями жесткой заделки второго конца балки, преодоление которых приводит к существенному удорожанию датчика, увеличению массы и размеров. Распределение напряжений в балке постоянного сечения неравномерное. Для получения равномерного распределения напряжений применяют балку равного сопротивления. Однако при этом следует учитывать, что собственная частота балки сильно зависит от массы присоединенных к ней элементов. Поэтому балочные упругие элементы применяют в тех случаях, когда кольцевые элементы не обеспечивают заданной чувствительности, например в датчиках силы с пределами измерения меньше 50 Н. Балочным упругим элементам отдается предпочтение также в тех случаях, когда требование одинаковых условий работы преобразователей неэлектрической величины в электрическую является определяющим.

15.1.2. Преобразователи давления

Упругие элементы, входной величиной которых является давление, применяют преимущественно для датчиков давления.

Наибольшей чувствительностью к измеряемому параметру обладает мембранная коробка рисунок 15.5).



Рисунок 15.5 – Конструкция мембранной коробки

В зависимости от геометрических размеров, формы и материала мембранной коробки может быть перекрыт широкий диапазон измеряемых давлений – от 1000 до 500 000 Па. Значительное перемещение стенок мембранной коробки позволяет использовать ее в сочетании с потенциометрическим измерительным преобразователем, который преобразует это перемещение в изменение сопротивления потенциометра.

Трубка Бурдона (рисунок 15.6), как упругий элемент, по своему назначению аналогична мембранной коробке, но ее применяют для высоких давлений (от 1 до 60 МПа).



Рисунок 15.6 – Конструкция трубки Бурдона

Мембрана с несимметричным центром (рисунок 15.7) нашла преимущественное применение в виброчастотных (струнных) датчиках давления с пределами измерения от 5 до 60 МПа.



Рисунок 15.7 – Конструкция мембраны с несимметричным центром

Упругие элементы в виде колпачков и полусфер (рисунок 15.8) применяют в датчиках давления в тех случаях, когда необходимо получить равномерные напряжения в области установки измерительных преобразователей (например, тензорезисторов).



Рисунок 15.8 – Конструкции колпачка и полусферы

Кроме того, они обладают малой тепловой инерцией. Недостатком их является отсутствие зон деформаций с разными знаками.

15.1.3. Преобразователи силы и давления

Из упругих элементов, входной величиной которых может быть как сила, так и давление, наибольшее распространение получили гофрированные мембраны (рисунок 15.9).

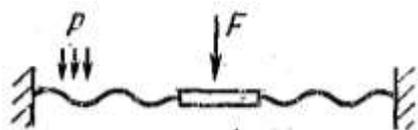


Рисунок 15.9 – Конструкция гофрированной мембраны

Их применяют в основном для датчиков давления, имеющих малые пределы измерения. Благодаря значительным перемещениям центра гофрированные мембраны применяют чаще всего в потенциометрических датчиках. Для преобразования силы в перемещение их используют в тех случаях, когда должна быть обеспечена высокая степень герметизации измерительной цепи при малых измеряемых силах.

При значительных нагрузках на такую мембрану резко растут ее размеры и масса, поэтому для больших сил (давлений) применяют плоскую мембрану в виде тонкой круглой пластинки (рисунок 15.10).

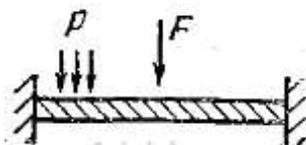


Рисунок 15.10 – Конструкция мембраны

Перемещение пластинки используется в качестве выходной величины в индуктивных и емкостных датчиках. Применение мембраны, преобразующей силу в деформацию, резко сокращает размеры датчика в направлении действия силы, и в тех случаях, когда по условиям эксплуатации накладывается такое ограничение, мембранные датчики силы имеют преимущество перед датчиками с упругими элементами других типов.

Жесткие мембраны находят также широкое применение как преобразователи давлений, создаваемых жидкими средами. Для преобразований очень больших давлений используют обычно мембрану с

жестким центром. Такой преобразователь состоит из двух преобразовательных элементов. Это собственно мембрана, преобразующая давление в сосредоточенную силу, и полый стержень, испытывающий деформацию под действием этой силы.

Полусферические, цилиндрические и другие оболочки как упругие элементы применяют лишь для построения специальных датчиков, когда, например, применение мембран исключается требованиями конструкции (в частности, если к конструкциям предъявляются высокие требования по прочности). Если к конструкциям предъявляются высокие требования по прочности, этим требованиям наиболее полно удовлетворяет сферический упругий элемент.

Сильфонные упругие элементы (рисунок 15.11) по сравнению с мембранными имеют большую чувствительность, поэтому их применяют в высокочувствительных датчиках для измерения сил и давлений.

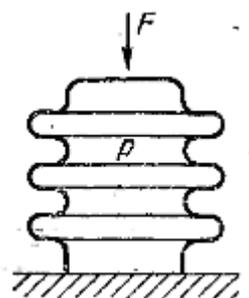


Рисунок 15.11 – Конструкция сильфона

Для построения датчиков механических параметров могут быть использованы и другие упругие элементы, отличающиеся от рассмотренных. Однако их применение обусловлено либо спецификой требований, предъявляемых к конкретному датчику, либо спецификой конструктивного решения.

15.2. Материалы упругих элементов

Так, механические преобразователи оказывают непосредственное влияние на формирование метрологических характеристик датчика. А это значит, что материал, из которого их изготавливают, должен иметь стабильные характеристики в широких пределах изменения влияющих величин. Одной из важных характеристик этого материала, определяющей чувствительность механических преобразователей, является модуль упругости. Для механических преобразователей нужны такие материалы, у которых величина модуля упругости не зависит от влияющих факторов: температуры, времени, вибраций, рабочих нагрузок и т. д. При этом, у всех сплавов модуль упругости зависит от температуры: с увеличением температуры он уменьшается. В этом случае необходимо выбирать материал, у которого температурная характеристика модуля упругости в требуемом диапазоне температур линейна

и достаточно стабильна. Тогда температурную погрешность датчика, появляющуюся за счет изменения модуля упругости, можно либо учесть, либо скомпенсировать введением в датчик соответствующего термокомпенсирующего звена.

Наиболее полно удовлетворяют требованиям к характеру температурной зависимости модуля упругости сталь 36НХТЮ и бронза БрБ2. Модуль упругости этих материалы изменяется практически линейно в широком диапазоне температур ($-200 - 600^{\circ}\text{C}$). Для этих материалов характерна неизменность модуля упругости после воздействия механической и температурной обработки.

Большое значение имеет также величина нелинейности нагрузочной характеристики материала, обусловленная зависимостью модуля упругости от рабочей нагрузки. Этому требованию удовлетворяют шарикоподшипниковая сталь ШХ15, конструкционная сталь 30ХГСА, сталь 36НХТЮ, бронза БрБ2 и многие другие.

Если требование к массе преобразователя является доминирующим, то, несколько снижая требования к метрологическим характеристикам, это требование можно удовлетворить, выбирая в качестве материала алюминиевый сплав АМг6 или сплав титана ВТ6.

Требования к определенному соотношению модуля упругости и удельной плотности материала предъявляют тогда, когда необходимо получить наибольшее быстродействие датчика при заданной его чувствительности. Для этих условий наибольшее распространение получили деформированные сплавы АМг6 и Д16Т.

15.3. Тензорезистивные датчики

В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление пьезоэффекта, заключающееся в изменении электрического сопротивления проводящего материала при его механической деформации. Основной характеристикой чувствительности материала к механической деформации является коэффициент относительной тензочувствительности k , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}$$

Так как сопротивление проводника связано с удельным электрическим сопротивлением ρ материала, длиной l и площадью поперечного сечения S_q этого проводника зависимостью

$$R = \rho \frac{l}{S_q},$$

то относительное изменение сопротивления, вызванное деформацией проводника под действием равномерного механического напряжения, равно

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S_q}{S_q} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

При деформации твердых тел изменение их длины связано с изменением объема. При этом изменение объема в зоне упругих деформаций для каждого материала является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом Пуассона.

$$k = 1 + 2\mu + \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

Механическое напряжение σ в исследуемой детали связано с модулем упругости E материала этой детали соотношением

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$$

Следовательно, уравнение преобразования тензорезистора можно представить в виде

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{k\sigma}{E}$$

Как материал исследуемой детали, так и материал проволоки тензорезистора должны подвергаться механическим напряжениям, не превышающим предела упругих деформаций, в противном случае в материале произойдут необратимые деформации. Поэтому допустимое значение напряжений не превышает 20...30% предела упругости.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалам тензорезисторов, являются также возможно большее значение коэффициента тензочувствительности, высокое удельное электрическое сопротивление. Кроме того, температурный коэффициент линейного расширения чувствительного элемента преобразователя должен быть по возможности равным температурному коэффициенту линейного расширения материала исследуемого объекта.

В практике измерительных преобразований тензоэффект используется в двух направлениях. Это, во-первых, изменение сопротивления проводника или полупроводника в результате объемного сжатия. Входной величиной такого преобразователя является давление окружающего его газа или жидкости. На этом принципе строятся датчики высоких и сверхвысоких давлений, которые изготавливаются в виде бескаркасной обмотки, намотанной обычно из манганиновой проволоки, а преобразователями низких давлений является германиевый или кремниевый тензорезистор.

Сущность второго направления заключается в использовании тензоэффекта растягиваемого или сжимаемого тензочувствительного материала. Преобразователи этой группы могут быть выполнены в виде наклеиваемых проволочных, фольговых или пленочных, либо так называемых свободных (навесных) тензопреобразователей.

15.3.1. Материалы тензорезисторов

Для изготовления тензорезисторов в настоящее время применяют проводниковые материалы, у которых $(1 + 2\mu) > m$, и полупроводниковые материалы, у которых $(1 + 2\mu) < m$.

У полупроводниковых тензорезисторов коэффициент тензочувствительности значительно больше, чем у проводниковых.

Коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов определяется в основном изменением удельного электрического сопротивления

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_I} \approx m = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}$$

Значения k полупроводниковых тензорезисторов, в отличие от проводниковых, в значительной мере зависят от степени деформации, температуры, удельного электрического сопротивления, типа проводимости и достигают 150...200. При этом в полупроводниках «-»-типа коэффициент тензочувствительности отрицательный, а в полупроводниках р-типа – положительный.

Для жидких тензорезистивных материалов (ртути, электролитов), практически не меняющих своего объема в процессе деформации, коэффициент тензочувствительности $k = 2$.

Для некоторых металлов удельное электрическое сопротивление практически не меняется под действием механических деформаций, а коэффициент k может быть для них принят равным $k = 1 + 2\mu$. Так как коэффициент Пуассона для металлов имеет значение 0,24...0,4, то значение коэффициента тензочувствительности часто считают примерно равным 1,48...1,8. В общем же случае коэффициент тензочувствительности проводника содержит составляющую, которая определяется изменением его удельного электрического сопротивления и может быть как положительной, так и отрицательной. Для металлов коэффициент тензочувствительности составляет 0,5...4.

В качестве материалов проволочных тензорезисторов используют чаще всего константан, нихром, элинвар, платинородий. Однако наибольшее распространение в отечественной тензометрии получили тензорезисторы из специальной константановой микропроволоки диаметром 0,025...0,035 мм.

15.3.2. Конструкции тензорезисторов

Особую группу проволочных тензорезисторов составляют «свободные» тензорезисторы, представляющие собой одну или ряд тензочувствительных проволок, закрепленных на токоизолированных штырях, жестко связанных с объектом измерения. В качестве тензочувствительной проволоки чаще всего

используют тензометрическую константановую проволоку или проволоку из сплава НМ23ХЮ.

Приклеиваемые тензорезисторы (рисунок 15.12)

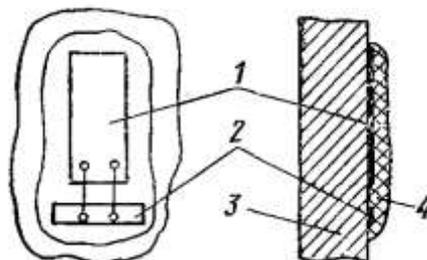


Рисунок 15.12 – Конструкция приклеиваемого тензорезистора

Тензорезистор 1 приклеивают по технологии, описанной в гл. 7, к объекту измерения 3. Выводы тензорезистора припаивают к контактной колодке 2, приклеенной к объекту измерения. Через контактную колодку тензорезистор включают в измерительную цепь, дополняемую обычно либо до делителя напряжения, либо моста. Для защиты тензорезистора от воздействия влажности окружающей среды и для обеспечения устойчивости к механическим влияющим факторам тензорезистор и монтажную схему покрывают специальным герметизирующим составом 4.

При наклейке свойства приклеенного тензорезистора, представляющего собой преобразователь разового действия, значительно отличаются от свойств неприклеенного. Поэтому градуировка неприклеенного тензорезистора практически невозможна, а градуируют другие тензорезисторы партии, приклеиваемые на тарировочные балки из материала объекта по возможности по той же технологии, которая принята для объекта измерения. Партии тензорезисторов присваивают усредненные характеристики, полученные на образцах этой партии. Для исключения из результата измерения погрешности от неидентичности приклейки рабочих и градуируемых преобразователей в качестве рабочих используют не один, а несколько тензорезисторов.

Проводниковые тензорезисторы в зависимости от исходной формы тензочувствительного материала подразделяют на проволочные и фольговые. В проволочных тензорезисторах тензо-чувствительным материалом является проволока диаметром 0,01 – 0,05 мм, в фольговых – фольга толщиной 0,004–0,012 мм.

Конструктивное исполнение как проволочных, так и фольговых тензорезисторов чрезвычайно многообразно.

Проволочный тензорезистор в общем случае представляет собой (рисунок 15.13) уложенную зигзагообразно между двумя

электроизоляционными подложками топкую тензочувствительную проволоку 1.

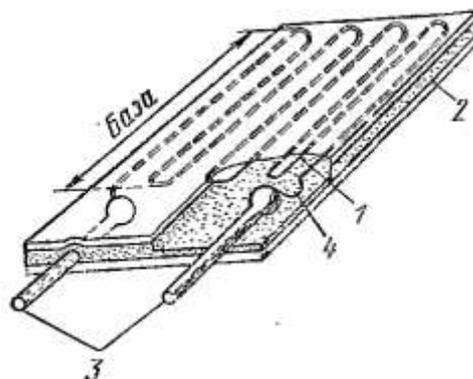


Рисунок 15.13 – Конструкция проволочного тензорезистора

К концам проволоки присоединены (пайкой или сваркой) выводные концы 3. Для упрочнения места закрепления выводных концов сверху и снизу тензорезистора приклеивают полоски бумаги 2 и делают разгрузочную петлю 4.

Электроизоляционные подложки выполняют из папиросной бумаги, лаковой пленки или цемента, скрепляемых между собой клеем, лаком или цементом, и тензорезисторы называют соответственно бумажными, лаковыми или цементными.

Зигзагообразную часть тензорезистора называют решеткой, а ее длину – базой.

Такие датчики имеют измерительную базу обычно 3...20 мм, а их сопротивление равно 20...500 Ом.

Для получения тензодатчиков с малой базой (1...3 мм) их делают двухслойными и изготавливают путем намотки тензочувствительной проволоки на трубчатый бумажный каркас, который после проклеивания расплющивается и наклеивается на подложку.

Фольговые тензорезисторы (рисунок 15.14) представляют собой тонкую ленту из фольги (толщиной 0,01–0,02 мм), на которой часть металла выбрана (например, травлением) таким образом, что оставшаяся часть образует решетку с выводами. Эта решетка закрепляется между пленками из лака.



Рисунок 15.14 – Конструкция фольгового тензорезистора

Они имеют определенные преимущества перед проволочными. В частности, поскольку отношение поверхности тензочувствительной дорожки к ее поперечному сечению велико, то улучшается теплоотдача, что позволяет значительно увеличить плотность тока, если только деталь, к которой приклеивается тензопреобразователь, не обладает очень малой теплоемкостью. Недостатком обычных фольговых преобразователей является сравнительно низкое сопротивление, не превышающее обычно 50 Ом.

Пленочные тензорезисторы. Процесс их изготовления заключается в вакуумной возгонке тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на подложку. Для изготовления пленочных тензорезисторов применяются как металлические (например, титаноалюминиевый сплав), так и полупроводниковые (германий, кремний) материалы. При изготовлении как фольговых, так и пленочных тензопреобразователей можно предусмотреть любой рисунок их решетки, что является существенным их достоинством, благодаря чему они находят применение для исследований механических напряжений деталей самой разнообразной конфигурации.

Существенным преимуществом при изготовлении как фольговых, так и пленочных тензорезисторов является возможность предусмотреть любой рисунок их решетки, благодаря чему они находят применение для исследований механических напряжений деталей самой различной конфигурации. Например, тензопреобразователь состоящий из двух тензочувствительных элементов, оси чувствительности которых размещены под углом 90° , используют при измерениях деформаций валов, вызванных крутящими моментами (рисунок 15.15а); мостовая структура тензорезистивных преобразователей, состоящая из четырех тензорезисторов, которые образуют четыре плеча измерительного моста. Тензомост наклеивается на жесткую мембрану. В результате действия на мембрану измеряемого давления тензорезисторы, размещенные в центре, воспринимают деформацию расширения, а периферийные – деформацию сжатия. Выводы 1 и 3 предназначены для подключения напряжения питания моста, 2 и 4 – выводы измерительной диагностики (рисунок 15.15б); розетка из трех тензорезисторов используется при измерениях механических напряжений в деталях, находящихся в плосконапряженном состоянии, в случае, когда

направление действия напряжений и их значения определяют по изменению сопротивлений данных трех тензорезисторов (рисунок 15.15в).

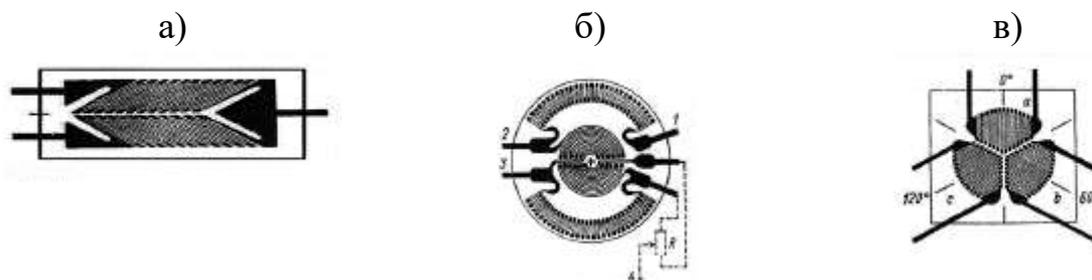


Рисунок 15.15 – Конструкции тензорезисторов специальной формы

Полупроводниковые тензорезисторы – это тонкие (до 0,01 мм) пластины из полупроводникового (чаще германий или кремний) материала. К концам такой пластины специальным методом крепят выводные проводники.

Полупроводниковая технология позволяет создание интегральных тензомодулей. У такого рода тензопреобразователей упругий элемент (мембрана) изготавливается из кристаллического полупроводника (обычно кремния), на котором методом диффузии формируют мостовую интегральную тензочувствительную схему.

Здесь тензорезистор и упругий элемент представляют единое целое. Следовательно, в отличие от наклеиваемых проволочных тензорезисторов, здесь отсутствует промежуточное вещество между упругим элементом и тензорезистором – клей, который является причиной дополнительных погрешностей у наклеиваемых тензорезисторов. Изоляция чувствительного элемента от тела упругого элемента осуществляется за счет p-n перехода.

Расчет датчиков деформаций состоит из выбора конструкции и материала тензорезисторов, расчета геометрических размеров, сопротивления тензорезистора, расчета компенсационных сопротивлений, расчета чувствительности и погрешности. Исходными данными для расчета являются требования технического задания на разработку датчика деформаций.

Конструкцию и материал тензорезисторов выбирают исходя из требований технического задания по пределам измерения, условиям установки датчика деформаций на объект измерения (материал объекта измерения, размеры, кривизна и состояние места под установку тензорезистора, возможность проведения термообработки), по температурному диапазону работы и по точности. При решении этих вопросов необходимо учитывать следующее. Для разработки датчиков деформаций чаще всего применяют проволочные тензорезисторы, так как они обеспечивают измерение деформаций в широких амплитудном и температурном диапазонах с достаточными в большинстве случаев точностями. Для измерения деформаций при отрицательных температурах предпочтительнее пленочные (лаковые) тензорезисторы, а при высоких

температурах – цементные. Полупроводниковые тензорезисторы благодаря высокой чувствительности дают возможность измерять уровень малых деформаций в узком температурном диапазоне. В тех случаях, когда необходимы высокие точности измерения деформаций, целесообразно применять градуируемые датчики деформаций.

Диаметр проволоки выбирают минимально возможным. Допустимый ток пленочных и фольговых тензорезисторов может быть значительно больше, так как у этих тензорезисторов условия охлаждения лучше, чем у проволочных, и зависит от соотношения ширины и толщины полоски тензорезисторов. Так, при отношении ширины к толщине полоски, равном 10, допустимый ток фольгового тензорезистора может быть в 1,4 раза больше, чем в проволочном тензорезисторе того же сечения. При отношении ширины к толщине, равном 40, соответствующее увеличение тока составляет 1,95. Допустимый ток полупроводниковых тензорезисторов можно принимать равным допустимому току фольговых тензорезисторов, а свободных тензорезисторов в 1,5–2 раза ниже, чем приклеиваемых.

По заданному напряжению питания и в зависимости от выбранной измерительной цепи рассчитывают сопротивление тензорезистора.

Расчет базы и ширины проволочного тензорезистора производят из следующих предпосылок. Для уменьшения габаритных размеров датчика необходимо уменьшать базу тензорезистора. Однако при заданном сопротивлении и материале тензорезистора уменьшение базы приводит к увеличению ширины, и при этом все большая часть проволоки оказывается нерабочей, что приводит к снижению коэффициента чувствительности. Поэтому отношение размера базы тензорезистора к его ширине должно лежать в пределах 2–5. Уменьшение ширины тензорезистора возможно за счет сокращения расстояния между отдельными проволочками. Однако чрезмерное уменьшение этого расстояния приводит к температурному воздействию одной стороны петли тензорезистора на другую, что требует снижения допустимого тока, и, кроме того, ограничено технологическими возможностями намотки тензорезисторов. Практически расстояние между проволочками выбирают в 10–20 раз больше диаметра проволоки.

Динамические свойства датчиков деформаций определяются динамическими свойствами объекта измерения. Верхняя граничная частота измерения деформаций достигает 100 кГц. Амплитудный диапазон датчиков деформаций определяется пределом прочности тензочувствительного материала и составляет для проволочных тензорезисторов на бумажной основе, а также пленочных и фольговых тензорезисторов от 0,005–0,02 до 1,5–2%.

15.4. Пьезоэлектрические датчики

Принцип действия пьезоэлектрических датчиков основан на использовании прямого или обратного пьезоэлектрических эффектов.

Сущность прямого пьезоэлектрического эффекта заключается в электрической поляризации определенного класса диэлектриков, называемых пьезоэлектриками (сегнетоэлектриками, ферроэлектриками), при механическом напряжении в их материале. Обратный пьезоэлектрический эффект характеризуется тем, что электрическая поляризация вызывает механическое напряжение в пьезоматериале или изменение геометрических размеров пьезоэлементов.

По другому можно сказать, что прямой пьезоэлектрический эффект заключается в образовании электрических зарядов в пьезоэлектрическом материале при приложении к нему механической силы, а обратный пьезоэффект – в возникновении колебаний при подключении пьезоэлемента к источнику электрического напряжения.

Особенностью пьезоэлектрического эффекта является знакочувствительность, т.е. изменение знака заряда при переходе от сжатия кристалла к растяжению и изменение знака деформации при изменении направления поляризующего поля.

В качестве пьезоэлектрических материалов используются:

- монокристаллические материалы (кварц, ниобат лития, сегнетова соль и др.);
- поликристаллические материалы (пьезокерамика);
- Пьезоэлектрические пленки.

В ненапряженном состоянии в пластине все заряды скомпенсированы, и она является электрически нейтральной. Если к пластине кварца вдоль оси X приложена сила F , то на ее гранях, перпендикулярных к оси X , возникают разнополярные электрические заряды Q . Значения этих зарядов в пределах упругих деформаций находятся в линейной зависимости от приложенной силы.

Пьезоэлектрические датчики можно разделить на два крупных класса в зависимости от физических эффектов, лежащих в их основе.

К первому классу относятся датчики, использующие прямой пьезоэффект. Они используются для измерения линейных и вибрационных ускорений, динамических и квазистатических давлений и усилий, параметров звуковых и ультразвуковых полей и др.

Ко второму, не менее обширному классу, относятся так называемые резонансные пьезодатчики. В их основе может лежать и прямой и обратный пьезоэффект. Они используются для измерения статических и динамических давлений и усилий, линейных и вибрационных ускорений, концентраций веществ в газах, вязкости, углов наклона и др.

Однако на основе того же пьезоэлектрического эффекта можно реализовать и прецизионные датчики силы, как активные, так и пассивные.

В пассивных наряду с преобразователями, в которых пьезоэлемент работает на сжатие-растяжение, применяются конструкции, в которых элемент работает на изгиб и сдвиг (рисунок 15.16). Преобразователь, работающий на изгиб, представляет собой две одинаковые пластины, склеенные между собой. Между ними располагается металлическая фольга. При изгибе такого элемента одна пластина удлиняется, а другая укорачивается.

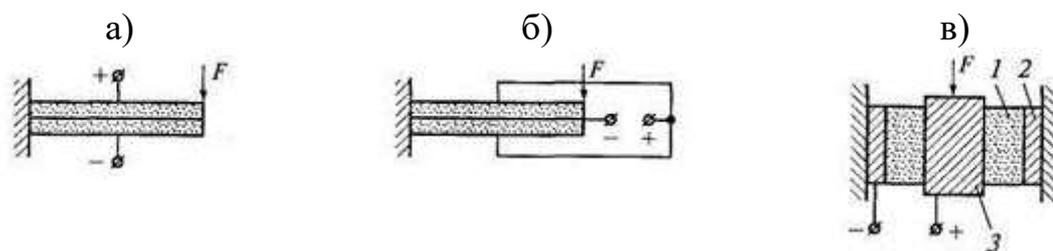


Рисунок 15.16 – Конструкции пьезопреобразователей

В зависимости от схемы подключения обкладок можно получить либо сумму напряжений (рисунок 15.16а), либо сумму зарядов (рисунок 15.16б). Преобразователь, работающий на сдвиг, представляет собой кольцо из керамики 1 (рисунок 15.16в), в которое вклеен внутренний электрод 3 и которое само вклеено во внешний электрод 2. Под действием силы F происходит деформация сдвига плоскостей, параллельных направлению поляризации. Достоинством такого преобразователя является отсутствие зарядов на электродах при боковых воздействиях на датчик.

При разработке таких датчиков всегда следует помнить, что пьезоэлектрические устройства не могут измерять стационарные процессы. Это означает, что пьезоэлектрические датчики силы преобразуют изменения силы в переменный электрический сигнал, но при этом они никак не реагируют на постоянное значение внешней силы.

Активные. Поскольку приложенные силы могут изменять некоторые свойства материалов, при разработке активных датчиков необходимо учитывать всестороннее влияние сигналов возбуждения. При проведении количественных измерений при помощи такого датчика следует помнить, что его диапазон измерения зависит от частоты механического резонанса применяемого пьезоэлектрического кристалла. Принцип действия таких датчиков основан на том, что при механической нагрузке кварцевых кристаллов определенных срезов, используемых в качестве резонаторов в электронных генераторах, происходит сдвиг их резонансной частоты (рисунок 15.17).

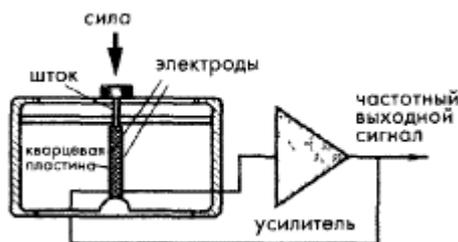


Рисунок 15.17 – Активный пьезопреобразователь

Пьезокерамические трансформаторы

Пьезоэлектрическим трансформатором называют пьезоэлектрический элемент с тремя и более электродами, подключенными к одному или нескольким источникам электрического сигнала и нагрузкам. В простейшем случае пьезоэлектрический трансформатор представляет собой пьезоэлемент с тремя электродами, образующими две системы электродов. Часть пьезоэлектрического трансформатора, подключенную к источнику электрического сигнала, называют возбудителем, а часть, подключенную к нагрузке, – генератором.

В возбудителе переменный электрический сигнал за счет обратного пьезоэффекта преобразуется в энергию акустических волн, которые, зарождаясь на границах электродов, распространяются по всему объему трансформатора. На частоте, равной одной из резонансных механических частот трансформатора, образуется стоячая волна с максимальной амплитудой колебаний. В генераторе пьезоэлектрического трансформатора механическое напряжение за счет прямого пьезоэффекта преобразуется в электрический сигнал (рисунок 15.18). На резонансных частотах коэффициент трансформации имеет максимальное значение.

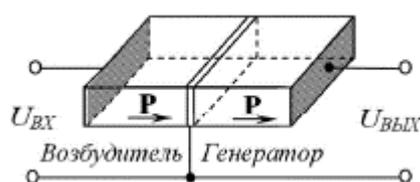


Рисунок 15.17 – Конструкция пьезокерамического трансформатора

15.5. Измерение крутящих моментов

15.5.1. Тензометрическая технология измерений (рисунок 15.18).

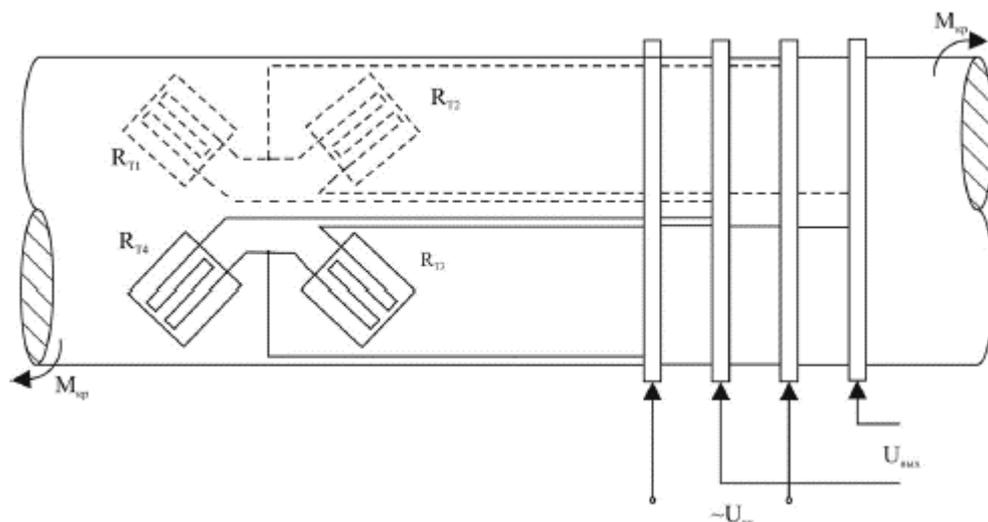


Рисунок 15.18 – Конструкция тензорезистивного датчика крутящего момента

Тензорезисторы размещаются на валу, передающем измеряемый крутящий момент. Как правило используется четыре тензорезистора, объединенных в полномостовую схему. Для подключения к тензорезисторам на валу устанавливаются токосъемные кольца.

15.5.2. Магнитоупругие торсиометры

В магнитоупругих преобразователях используется измерение магнитной проницаемости ферромагнитных тел в зависимости от механических напряжений, возникающих под действием приложенных сил. В качестве чувствительного элемента для измерения крутящего момента используется участок вала, выполненный из обычной мягкой стали.

При скручивании вала магнитная проницаемость увеличивается в направлении 45° к оси и уменьшается в перпендикулярном направлении, пропорционально приложенному моменту. Это связано с появлением растягивающих и сжимающих усилий, направленных по этим осям.

В простейшем из применяемых магнитоупругих преобразователей – торсиометре перекрестного типа, схема которого приведена на рисунке 15.19, две обмотки с сердечниками U-образной формы расположены перпендикулярно друг другу и помещаются вблизи поверхности вала с зазором 2–3 мм.

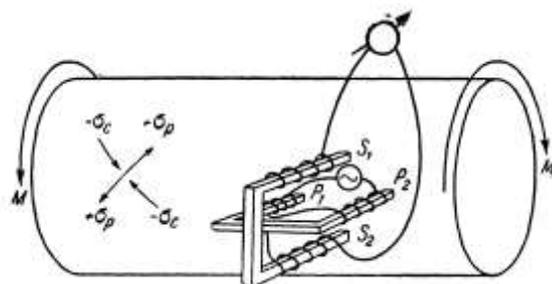


Рисунок 15.19 – Конструкция магнитоупругого торсиометра

Одна из катушек включена в сеть переменного тока, причем поле, создаваемое этой катушкой, при отсутствии нагрузки симметрично относительно сердечника второй катушки. С появлением крутящего момента симметрия поля нарушается. В результате этого через сердечник второй катушки проходит магнитный поток и на ее обмотке появляется напряжение.

15.5.3. Фотоупругие преобразователи крутящего момента

В фотоупругих преобразователях используется зависимость двойного лучепреломления некоторых изотропных веществ, например синтетических смол, от их деформации, вызванной внешними силами.

Тонкие пленки таких смол хорошо сцепляются с металлом и деформация их, таким образом соответствует деформации поверхностного слоя металлической детали.

В приборах для измерения крутящего момента тонкий слой вещества с двойным лучепреломлением наносится на упругий вал в виде кольца постоянной толщины. Измерение деформации, пропорциональной приложенному моменту, производится по изменению прошедшего через вещество и отраженного от поверхности упругого вала светового потока, направленного в виде узкого луча на поверхность кольца.

15.5.4. Фотоэлектрические приборы для измерения крутящего момента

На валу, подвергаемом скручиванию, устанавливаются на некотором расстоянии два диска с прорезями. По одну сторону дисков располагается источник света, по другую – фотоэлемент. Изменение угла закручивания вала приводит к изменению размеров светового окна, образуемого прорезями обоих дисков, и, следовательно, светового потока, попадающего на фотоэлемент. Величина тока на выходе фотоэлемента служит, таким образом, мерой приложенного момента. Вместо одного фотоэлемента и одного источника в более поздних конструкциях для устранения пульсаций выходного сигнала при вращении устанавливаются группа источников и группа фотоэлементов.

Изменение светового потока, вызываемое закручиванием вала, может быть получено при использовании измерительных дисков, выполненных из поляризирующего материала. Схема такой измерительной уставов-

15.5.5. Временные методы измерения крутящего момента

Развитию приборов временного и фазового методов измерения крутящего момента в значительной мере способствовал прогресс электронной и полупроводниковой импульсной техники.

Установки для измерения крутящего момента временным методом работают следующим образом. В цепи передачи момента устанавливается упругий элемент, на концах которого расположены измерительные диски с соответствующими метками, равномерно распределенными по периферии дисков. Рядом с дисками устанавливаются неподвижно индуктивные,

емкостные, фотоэлектрические или другие бесконтактные датчики. При вращении дисков происходит считывание меток датчиками. <На выходе последних появляются электрические сигналы. Временное соотношение между последовательностью сигналов одного датчика относительно сигналов второго зависит от угла закручивания упругого элемента и скорости вращения.

15.5.6. Приборы фазового метода измерения крутящего момента

Фазовый метод измерения крутящего момента весьма сходен с временным способом, он отличается тем, что здесь измеряется не временное запаздывание, зависящее от скорости вращения вала, а отношение временного сдвига к периоду вращения, которое зависит лишь от угла закручивания упругого элемента.

Как и в приборах временного способа, между двигателем и нагрузкой располагается упругий элемент, на концах которого установлены измерительные диски с метками. При вращении вала производится считывание меток неподвижно установленными датчиками. Временной сдвиг между импульсами одного датчика и импульсами другого – пропорционален углу закручивания упругого элемента и периоду вращения вала.

16. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Преобразователи для измерения давления работают на механическом принципе, связанном с применением эластичного узла из материала, который реагирует на перемещение, когда на него воздействует давление.

16.1. Типы датчиков давления

Датчики давления бывают трех типов, позволяющих измерять абсолютное, дифференциальное и манометрическое давление.

Абсолютным называется давление вещества относительно вакуума. Разностное, или дифференциальное, давление определяется относительно некоторого ненулевого опорного давления. Избыточное давление измеряется относительно атмосферного давления. В действительности все методы определения давления являются относительными, поскольку всегда измеряется разность давлений между двумя сторонами чувствительного элемента. Поэтому нетрудно установить, какой тип давления (абсолютное, дифференциальное или избыточное) показывает измерительный преобразователь. В любом из них фиксируется давление на одной стороне чувствительного элемента по отношению к вакууму, другому сравниваемому давлению или давлению окружающей атмосферы (рисунки 16.1).

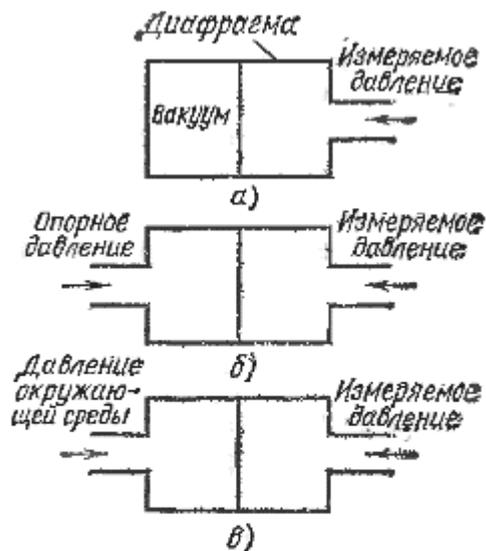


Рис. 6.8. Адаптирование простого преобразователя давления для измерения абсолютного давления (а), разностного давления (б) и избыточного давления (в)

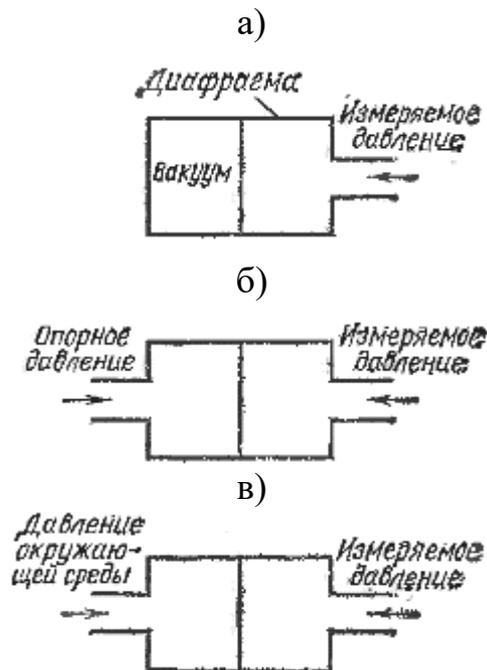


Рисунок 16.1 – Конструкции преобразователей давления: а – абсолютного; б – разностного; в – дифференциального

Во всех трех типах датчиков используются одинаковые конструкции диафрагм и датчиков, но все они имеют разные корпуса.

16.2. Трубки Бурдона

Чувствительные элементы, входящие в состав датчиков давления, являются механическими устройствами, деформирующимися под действием внешнего напряжения.

Помимо рассмотренных упругих элементов (мембран, сильфонов и т.п.) существуют специальные – трубки Бурдона (С-образные, спиральные и закрученные) форма которых меняется под действием на них давления.

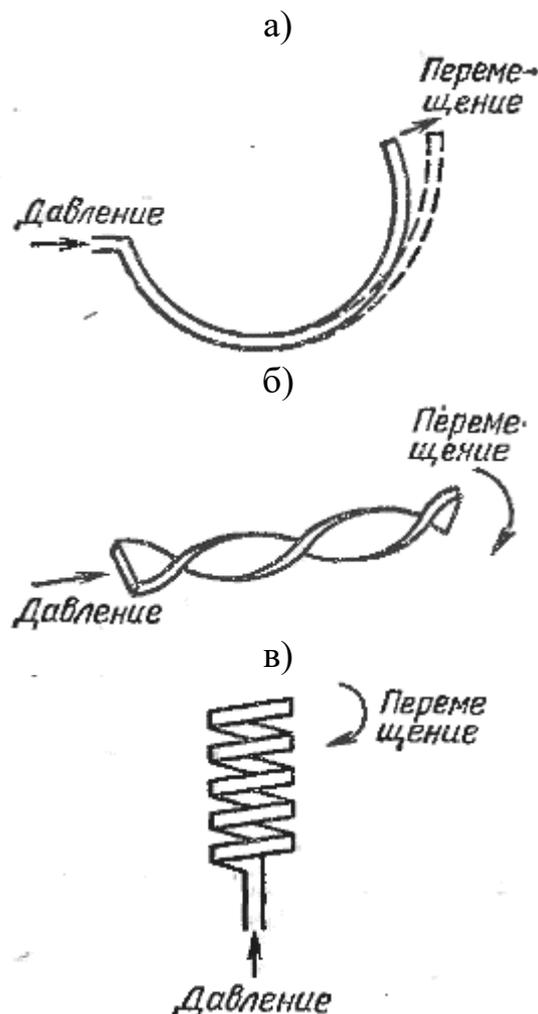


Рисунок 16.2 – Конструкция трубок Бурдона (а – одиночная; б – двойная; в – спиральная)

При подаче в трубку Бурдона газа, жидкости или пара под избыточным давлением кривизна трубки изменяется, и она выпрямляется. При разряжении внутри трубки кривизна возрастает и трубка скручивается. Изменение величины изгиба обусловлено изменением формы сечения при изменении давления. Под действием давления эллиптическое или овальное сечение деформируется, стремясь к круговому. Это приводит к угловому перемещению на небольшую величину свободного конца трубки.

Перемещение свободного конца трубки пропорционально давлению до определенного предела, после которого деформация растет быстрее

увеличения давления. Этот предел называется пределом пропорциональности трубки и является ее важной характеристикой. Чтобы не допустить возникновения остаточной деформации (выход из строя трубки) величина наибольшего рабочего давления устанавливается ниже предела пропорциональности.

Величина рабочего перемещения трубки Бурдона достаточно для чисто механического преобразования сигнала и индикации показаний вращающейся стрелкой (рисунок 16.3).

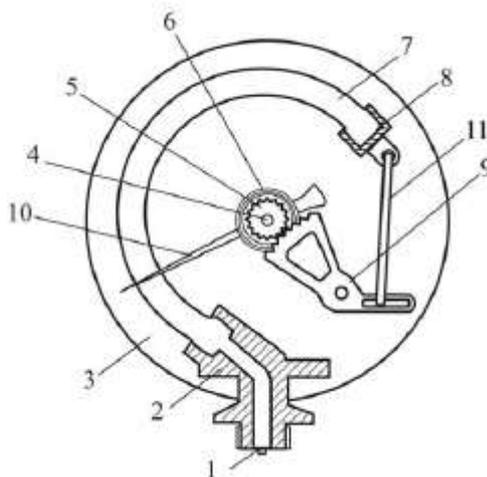


Рисунок 16.3 – Конструкция манометра с трубчатой пружиной:

- 1 – ниппель; 2 – держатель; 3 – корпус; 4 – ось; 5 – шестерня; 6 – пружина; 7 – трубчатая пружина; 8 – запаянный конец; 9 – зубчатый сектор; 10 – стрелка; 11 – тяга

Так как перемещение конца трубки очень небольшое, то в конструкцию прибора введен передаточный механизм, увеличивающий сигнал перемещения.

16.3. Преобразование в электрическую величину

По виду преобразования различают:

– Тензометрические преобразователи давления в виде соединения тензорезистора с упругим элементом;

– Емкостные преобразователи давления. В таких конструкциях (рисунок 16.4) чувствительный элемент образует одну пластину конденсатора и за счет его деформации изменяется расстояние до неподвижной пластины (или нескольких при дифференциальной схеме).

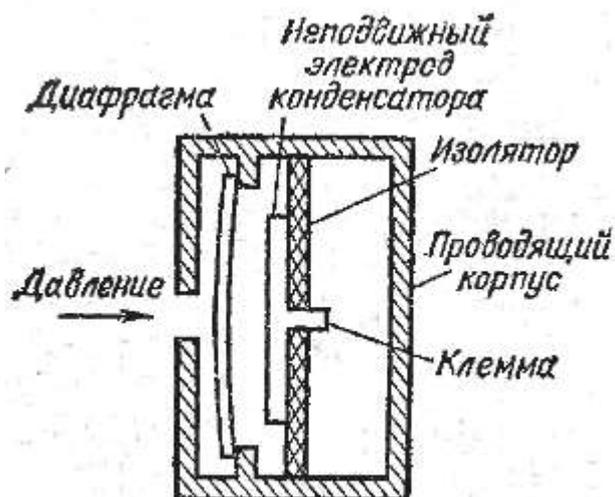


Рисунок 16.4 – Конструкция емкостного преобразователя давления

– Индуктивные преобразователи давления. В таких конструкциях (рисунок 16.5) используется упругий элемент с большим выходным перемещением (например, сильфон или анероидная коробка), на котором закреплен якорь, перемещающийся относительно неподвижной катушки. Может использоваться одиночная, дифференциальная, трансформаторные схемы.

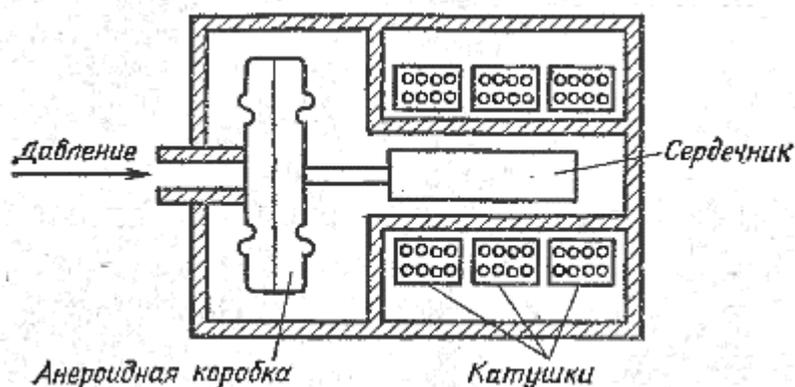


Рисунок 16.5 – Конструкция индуктивного преобразователя давления

17. РАСХОДОМЕРЫ

Термин расход обозначает перемещение текущей среды – жидкости или газа. Расходомеры – это преобразователи, которые используются для измерения потока. Они регистрируют скорость и расход жидкого или газообразного вещества за заданный период времени.

1. Массовый расход представляет собой массу вещества, протекающего в единицу времени, и измеряется, например, в $\text{кг} \times \text{с}^{-1}$.

2. Объемный расход, $\text{м}^3 \times \text{с}^{-1}$, равен объему вещества, протекающего в единицу времени.

3. Скорость потока измеряется в $\text{м} \times \text{с}^{-1}$.

В большинстве измерений речь идет об объемном расходе. При этом все три параметра взаимосвязаны и по одному из них можно вычислить остальные (с учетом изменения давления, плотности, температуры и др.).

17.1. Механические средства измерения расхода

Простейшими и поэтому наиболее распространенными являются методы с использованием механических чувствительных элементов, в которых поток перемещает или вращает твердое тело. Таким образом это перемещение или вращение тела оказывается пропорциональным расходу.

17.1.1. Расходомеры обтекания

У большинства расходомеров обтекаемое тело (поплавок, диск, поршень) перемещается прямолинейно, обычно вдоль своей вертикальной оси (рисунок 17.1а). Но имеется группа приборов, у которых обтекаемое тело (лопасть, диск) поворачивается вокруг оси подвеса (рисунок 17.1б).

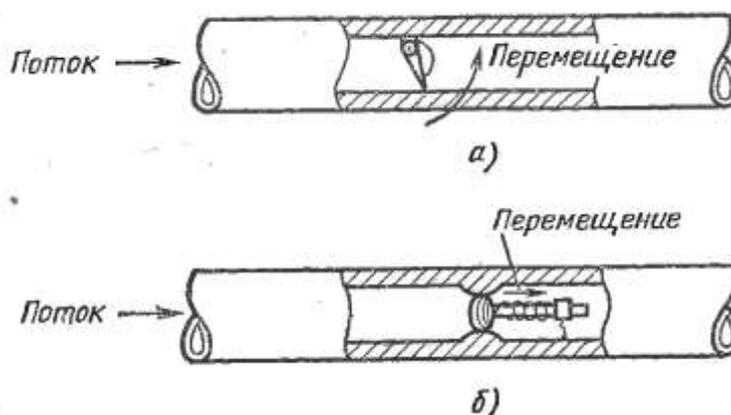


Рисунок 17.1 – Конструкции расходомеров обтекания

На рисунке 17.1 показаны основные механические методы измерения расхода. В частности, на рисунке 17.1а изображена нагруженная пружиной и подвешенная на шарнире лопасть, которая отклоняется, открывая отверстие, когда текучая среда проходит через преобразователь. Чем больше расход, тем сильнее открывается отверстие, т. е. тем больше отклоняется лопасть.

На рисунке 17.1б показан преобразователь, в котором используется тот же самый метод, но с ограниченной пружиной заглушкой.

17.1.2. Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры и счетчики, имеющие подвижной, обычно вращающийся элемент, скорость движения которого пропорциональна объемному расходу (рисунок 17.2).

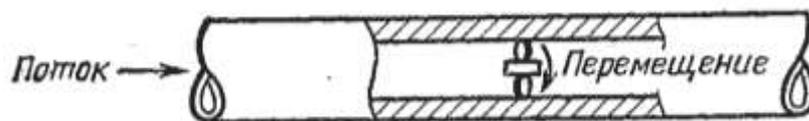


Рисунок 17.2 – Конструкция тахометрического расходомера

В общем случае вращающийся элемент выполняется из ферромагнитного материала. Поэтому катушка, укрепленная на корпусе расходомера, используется для определения частоты вращения. Электромагнитный чувствительный элемент создает эффект торможения, что при низких скоростях протекания вещества может сказываться на угловой скорости вращения чувствительного элемента. При измерениях малых расходов применяются другие конструкции чувствительных элементов, например электрооптические.

При точных измерениях важно, чтобы не происходило завихрения протекающего вещества, поскольку это напрямую сказывается на частоте вращения чувствительного элемента. Поэтому спрямляющие поток лопасти устанавливаются обычно на входе расходомера. Эти лопасти формируют также одну из опорных точек турбинки. Конечно, возможны и существенно более простые конструкции расходомеров, когда точность измерений не существенна, т. е. если торможение и завихрение потока можно не учитывать.

Одним из преимуществ турбинных расходомеров по сравнению с расходомерами других типов является линейная зависимость их выходного сигнала от скорости потока в установленном для прибора диапазоне.

По виду они подразделяются на:

- Крыльчатые расходомеры (ось вращения крыльчатки перпендикулярна направлению движения жидкости) применяются для измерения малых расходов.
- Турбинные расходомеры (ось вращения турбинки параллельна направлению движения потока жидкости) - применяются для измерения больших расходов.
- Шариковые (чувствительным элементом является шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного потока, как показано на рисунке 17.3).

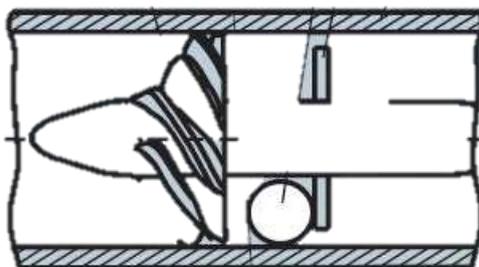


Рисунок 17.3 – Конструкция шарикового расходомера

17.1.3. Измерение расхода на основе перепада давлений

Если жидкость или газ нагнетаются через некоторое препятствие в трубопроводе, то изменение их скорости вызывает перепад давления, пропорциональный расходу. Измерив перепад давлений (для этого обычно используется измерительный преобразователь перепада давлений), можно определить расход вещества.

Наиболее распространенным типом расходомеров на основе перепада давлений или расходомеров с изменяющимся давлением является трубка Вентури (рисунок 17.4), в которой текучее вещество проходит как бы через горлышко бутылки, вставленное в трубопровод.

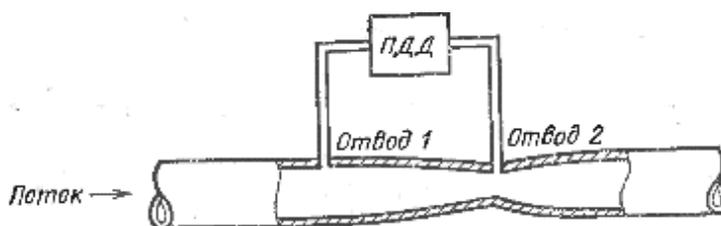


Рисунок 17.4 – Конструкция расходомера с трубкой Вентури

Другим весьма распространенным расходомером на основе перепада давлений является трубка Пито (рисунок 17.5), в которой трубка датчика вводится через стенку основного трубопровода и направляется своим отверстием непосредственно навстречу потоку жидкости или газа.

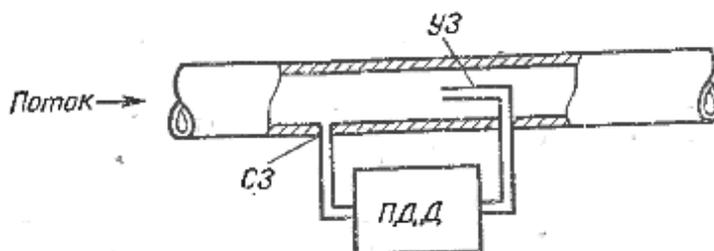


Рисунок 17.5 – Конструкция расходомера с трубкой Пито

Этот датчик играет роль ударного зонда. Второй зонд (статический датчик) размещается непосредственно в стенке трубопровода. Разность ударного и статического давлений и определяет расход.

На рисунке 17.6 показан преобразователь с измерительной диафрагмой.

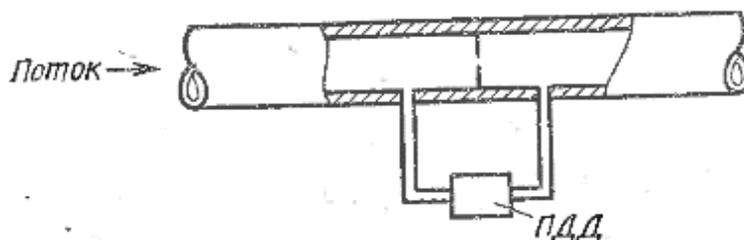


Рисунок 17.6 – Конструкция расходомера с диафрагмой

На рисунке 17.7 – с секцией центрифуги.

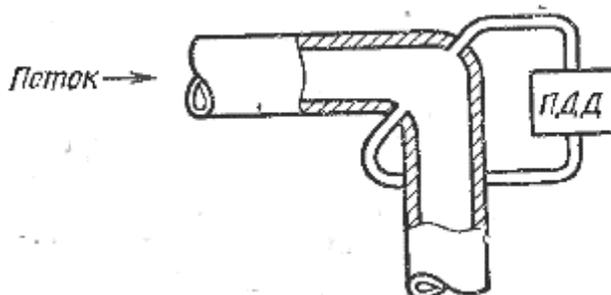


Рисунок 17.7 – Конструкция расходомера с секцией центрифуги

Недостаток рассмотренных приборов состоит в том, что скорость потока оказывается пропорциональной квадратному корню из перепада давлений, т. е. эти приборы являются существенно нелинейными. Эти преобразователи также не могут быть использованы для измерения расхода газа, поскольку их принцип действия основан на том факте, что вещество является несжимаемым при прохождении узких участков в трубопроводе. Газы, к сожалению, сжимаемые вещества, поэтому требуется вносить соответственные коррекции в показания приборов.

17.2. Измерение расхода на основе термальных явлений

17.2.1. Термальные расходомеры

Они работают на принципе пропорциональности тепла, переносимого веществом от одной точки к другой, массовому расходу этого вещества. На рисунке 17.8 показано, как два измерительных преобразователя температуры (ИПТ) определяют температуру вещества до и после нагревания, которое осуществляется нагревательным элементом, расположенным между этими преобразователями.

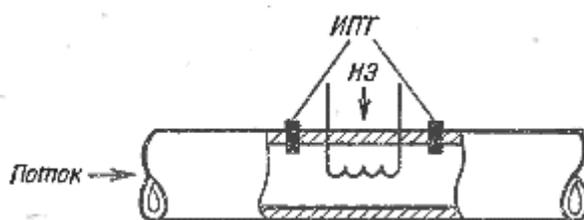


Рисунок 17.8 – Конструкция термального расходомера

17.2.2. Термоанемометры

Они измеряют расход вещества с помощью одиночного нагревательного элемента, расположенного в его потоке (рисунок 17.9). Охлаждающий эффект протекающего через этот элемент вещества характеризует массовый расход, т. е. _ охлаждение индицируется благодаря изменению сопротивления проводов нагревательного элемента. Часто вместо проволочного элемента в преобразователе используется металлическая пленка. С помощью термоанемометра удастся измерять чрезвычайно быстрые флуктуации расхода вещества.

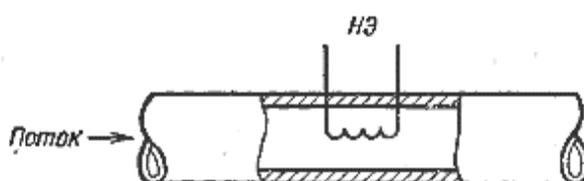


Рисунок 17.9 – Конструкция термоанемометра

17.2.3. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия (рисунок 17.10) основан на изменении ЭДС, индуцируемой в потоке электропроводящей жидкости под действием внешнего магнитного поля. Электромагнитные расходомеры применяют для измерения расхода жидкостей, у которых электропроводность не менее 10^{-4} Си/м. Более широкое применение получили электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем

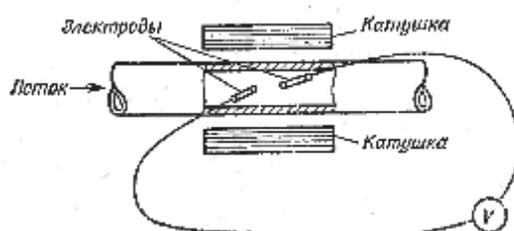


Рисунок 17.10 – Принцип действия электромагнитного расходомера

Преимущества: не препятствуют протеканию жидкости, поэтому могут применяться для измерения расхода загрязненных химически активных жидкостей с твердыми включениями.

Недостатки: применение метода только для электропроводных жидкостей, сложность измерительной схемы, ее подверженность влиянию многих помех.

17.3. Измерение расхода путем генерирования завихрений в протекающем веществе

Любое препятствие в трубопроводе создает завихрение в потоке вещества (рисунок 17.11), пропорциональное его объемному расходу. В преобразователях используются два способа генерирования завихрений: вынужденные колебания (рисунок 17.11а), при которых поток вещества вращается или прецессирует вдоль оси трубопровода в виде некоторой спирали, и естественные колебания (рисунок 17.11б), при которых стабильные структуры (известные как «уличные» вихри фон Карманна) периодических вращающихся в разные стороны вихрей возникают в потоке за препятствием.

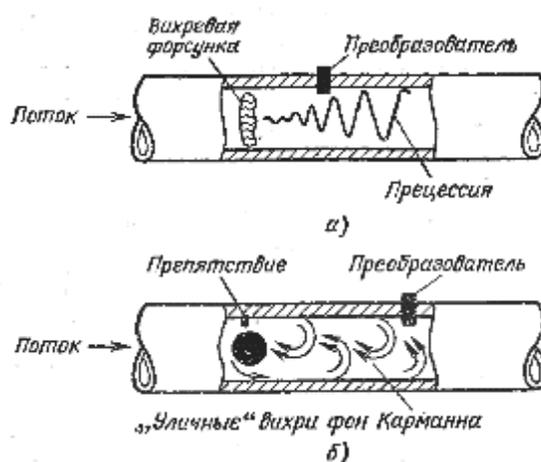


Рисунок 17.11 – Способы генерирования завихрений

В расходомерах с генерированием вынужденных колебаний обычно используют пьезоэлектрические преобразователи для определения числа прецессий, проходящих через конкретную точку трубопровода. В расходомерах с естественными колебаниями вещества применяются тензометрические преобразователи силы или ультразвуковые средства для определения периодических изменений силы, происходящих при вихревом движении вещества.

17.4. Ультразвуковой метод измерения расхода

Ультразвуковые приборы можно применять не только в качестве преобразователя в расходомерах с генерированием естественных колебаний вещества, но и непосредственно для измерения расхода. При этом используют рассмотренные ранее способы. Например, измеряют время, затрачиваемое на прохождение ультразвуковым импульсом через вещество, или прибегают к эффекту Доплера, при котором частота колебаний на входе приемника

ультразвукового излучения изменяется в зависимости от скорости жидкости или газа.

18. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

Чувствительные элементы, у которых в зависимости от влажности изменяются некоторые свойства, используются в измерительных преобразователях влажности. Простейший чувствительный элемент выполняется в виде гигроскопического элемента (поглощающего молекулы воды), плотно прижимаемого пружинным устройством. Любая абсорбция или десорбция изменяет длину элемента, и каждая маркированная точка устройства перемещается в одном или другом направлении в зависимости от уровня абсорбции. Это перемещение затем воспринимается прибором с помощью одного из известных принципов преобразования. Хотя наиболее распространенными являются неорганические чувствительные элементы, иногда применяются и органические, даже человеческая кожа.

В резистивных гигроскопических элементах используется их свойство изменять свое сопротивление при колебаниях влажности. Они представляют собой проволочные элементы, покрытые водным раствором соли. Слой соли изменяет свое сопротивление в зависимости от местной влажности. Могут быть сконструированы гигроскопические элементы, у которых при колебаниях влажности варьируется поверхностное сопротивление (например, элемент Попе, включающий в себя полистерин, обработанный серной кислотой).

Гигрометрические элементы на основе окиси алюминия с изменением влажности изменяют не только свое сопротивление, но и емкость. Конструктивно такой элемент представляет собой алюминиевую подложку, формирующую одну обкладку конденсатора, со слоем окиси алюминия и тонким слоем золота (достаточно тонким, чтобы иметь поры), формирующим другую его обкладку. Структура окиси алюминия такова, что этот слой является пористым и впитывает пары воды, вследствие чего изменяется диэлектрическая постоянная и, следовательно, емкость конденсатора.

Если кварцевый кристалл покрыть гигроскопическим материалом, то его резонансная частота будет зависеть от влажности, поскольку влажность влияет на общую массу кристалла.

Датчики, реализованные на основе термисторов, измеряют влажность по изменению теплопроводности газов. Такие датчики состоят из двух крошечных термисторов, закрепленных при помощи очень тонких проводов для снижения тепловых потерь за счет теплопроводности через корпус. Исследуемый газ через небольшие вентиляционные отверстия воздействует на левый термистор, при этом правый термистор размещается в герметичной камере с сухим воздухом. Оба термистора включены в мостовую схему, на которую подается напряжение. При прохождении через термисторы тока их температура повышается до 170°C относительно температуры окружающей

среды. Балансировка моста проводится в условиях сухого воздуха, в уравновешенном состоянии выходное напряжение должно быть равно нулю. При отклонении абсолютной влажности воздуха от нулевого значения происходит постепенное повышение выходного напряжения. Однако при концентрации паров 150 г/м^3 оно начинает падать, а при концентрации 345 г/м^3 – даже меняет свою полярность.

Оптический гигрометр реализует вычисление абсолютной и относительной влажности по температуре точки росы (определяется по температуре, при которой жидкая и газовая фазы воды находятся в равновесии). Измеряя температуру точки росы при известном значении давления, всегда можно найти абсолютную влажность. Основным элементом оптического пирометра является зеркало, температура поверхности которого точно регулируется при помощи термоэлектрического насоса. Пороговая температура зеркала настраивается на температуру точки росы. Исследуемый воздух при помощи насоса прогоняется над поверхностью зеркала. Если температура зеркала пересекает точку росы, на его поверхности конденсируются капли воды. При этом отражающие свойства зеркала изменяются, поскольку капли воды рассеивают лучи света, что детектируется соответствующим фотодетектором.

19. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

По виду выходного сигнала различают дискретные и непрерывные измерители уровня. Дискретные используются для определения достижения жидкостью нескольких заданных уровней (как правило, максимального и минимального), непрерывные позволяют определить текущий уровень.

По конструкции и принципу работы выделяют следующие виды датчиков уровня (уровнемеров).

19.1. Поплавковые уровнемеры

Они применяются в основном для непрерывного определения уровня. В такой конструкции на поверхности жидкости находится поплавок, связанный с датчиком перемещения. При изменении уровня жидкости поплавок перемещается вместе с ним, соответственно, сигнал датчика перемещения непрерывно связан со значением уровня.

19.2. Определение уровня путем измерения проводимости

Если электроды поместить в жидкость, уровень которой измеряется, то изменение проводимости будет отражать ее уровень. Причем ток через жидкость должен быть достаточно малым, чтобы исключить возможность электролиза или взрыва. Этот метод может быть реализован лишь при измерении уровня электропроводящей жидкости.

19.3. Емкостной метод определения уровня жидкости

При реализации этого метода электроды также погружены в жидкость, но последняя используется как диэлектрик между двумя электродами, которые образуют конденсатор. Изменение уровня жидкости означает, что изменяется диэлектрическая постоянная и, следовательно, емкость преобразователя.

Когда емкость, где находится жидкость, выполнена из металла, ее можно использовать в качестве одного из электродов преобразователя.

19.4. Фотоэлектрический метод определения уровня жидкости

В общем случае фотоэлектрические методы применяются только для определения дискретных уровней жидкости.

На рисунке 19.1 показан метод определения уровня жидкости, в котором используются физически разделенные фотоэлектрические источники и детекторы.

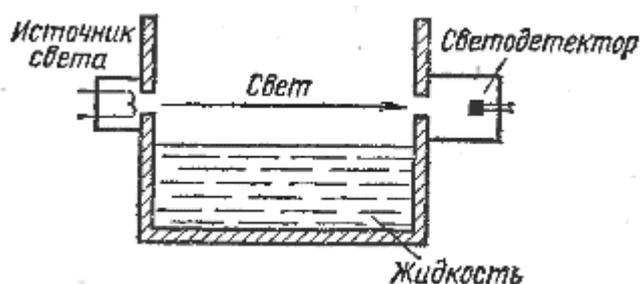


Рисунок 19.1 – Определение уровня жидкости разделенными источником и приемником света

Поэтому луч между ними прерывается, когда уровень жидкости превышает высоту установки этих приборов. Практически луч света полностью не прерывается, а лишь существенно ослабляется. В преобразователе используется соответствующая схема сопряжения, которая определяет точку его переключения.

Во втором методе применяются расположенные в одном корпусе источник света, детектор и призма (рисунок 19.2).

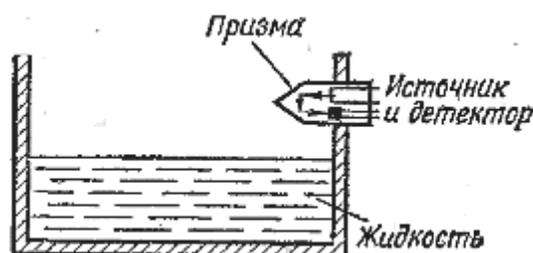


Рисунок 19.2 – Определение уровня жидкости с помощью призмы

Свет от источника претерпевает внутреннее отражение и попадает на детектор, когда корпус преобразователя находится в газовой среде. Как только жидкость покрывает корпус, изменяется индекс отражения между призмой и окружающей средой и луч света уже не отражается к детектору. С технической точки зрения в таких приборах можно использовать не только излучение видимого света, но также ультрафиолетовое и инфракрасное.

19.5. Ультразвуковой метод

Этот метод применяется для измерения как дискретных, так и непрерывных значений уровня. Различают три режима работы ультразвуковых преобразователей уровня.

Первый из них напоминает фотоэлектрический метод (рисунок 19.3).

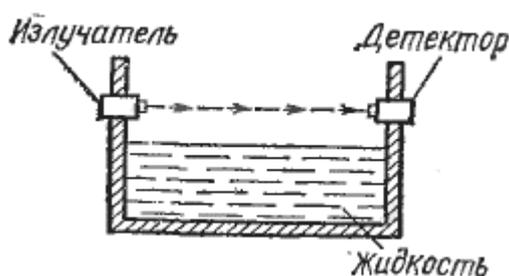


Рисунок 19.3 – Определение уровня жидкости по прохождению ультразвуковой волны

При его реализации излучатель и детектор монтируются в емкости так, что между ними образуется прямой путь волны в газе. Когда уровень жидкости поднимается и она покрывает преобразователь, ультразвуковые волны существенно поглощаются при прохождении к ранее определенной точке переключения. Так же как и в первом, фотоэлектрическом методе, рассмотренный режим можно использовать лишь для определения дискретных уровней жидкости.

Второй метод, основанный на отражении ультразвуковых волн от поверхности жидкости (рисунок 19.4), применяется для непрерывного измерения уровня.

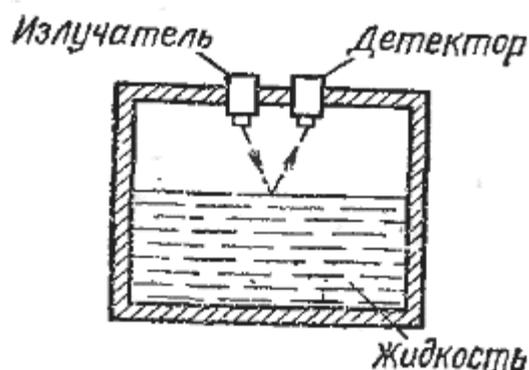


Рисунок 19.4 – Определение уровня жидкости по отражению ультразвуковой волны

Импульсы излучения попадают на поверхность жидкости, отражаются от нее и поступают в детектор. Промежуток времени между излучением и приемом импульса характеризует расстояние от поверхности жидкости до преобразователя. При вычислении уровня жидкости принимается в расчет скорость звука в среде между прибором и поверхностью жидкости. В преобразователях излучатель и детектор могут располагаться отдельно (как показано на рисунке) либо в одном корпусе.

Третий метод ультразвукового определения уровня жидкости показан на рисунке 19.5, в этом случае внутри емкости размещается эмиттер, излучающий ультразвуковые волны в пространстве над поверхностью жидкости.

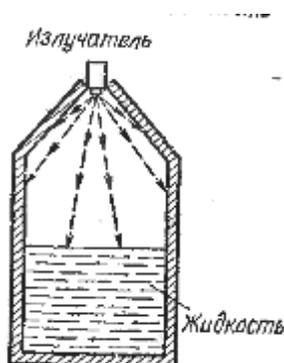


Рисунок 19.5 – Определение уровня жидкости по резонансу ультразвуковой волны

Ультразвуковые колебания оказываются в резонансе с колебаниями полости над поверхностью жидкости или в резонансе с гармониками собственных колебаний этой полости. При разном уровне жидкости резонансная частота оказывается различной, поэтому путем измерения частоты новых колебаний определяется уровень жидкости.

20. АКУСТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Основной измеряемой величиной в акустике является звук, хотя существуют и другие производные от него измеряемые величины. Прежде всего это уровень звукового давления. Кроме них здесь рассматриваются также распространение звука в воде и ультразвуковые колебания.

Датчики, работающие в слышимом диапазоне, обычно называются микрофонами. Однако это название может употребляться и для детекторов ультразвуковых и инфразвуковых волн. По существу, микрофон является датчиком давления, приспособленным для преобразования звуковых волн в широком спектральном диапазоне, из которого обычно исключены очень низкие частоты (ниже нескольких герц) Микрофоны обычно характеризуются: чувствительностью, направленностью, полосой частот, динамическим диапазоном, размерами, стоимостью и т.д. Для работы в разных средах используются различные конструкции акустических датчиков. Например для детектирования волн в воздухе или вибраций в твердых телах применяются микрофоны, а для работы в жидкой среде – гидрофоны (приставка «гидро» произошла от греческого названия мифологической водяной змеи Гидры). Основное отличие между обычным датчиком давления и акустическим преобразователем заключается в том, что последнему не приходится измерять постоянное или очень медленно меняющееся давление. Его рабочий частотный диапазон начинается с нескольких герц (иногда с десятков миллигерц), а заканчивается в районе нескольких мегагерц для ультразвуковых датчиков, и даже нескольких гигагерц для устройств, реализованных на поверхностных акустических волнах (ПАВ).

Поскольку акустические волны являются механическими волнами, любой микрофон или гидрофон имеет ту же основную структуру, что и датчик давления: в его состав входит диафрагма и преобразователь перемещений, преобразующий отклонение диафрагмы в электрический сигнал. Поэтому все акустические преобразователи отличаются только конструкцией этих двух компонентов. Хотя некоторые из них могут также включать дополнительные компоненты, такие как звукопоглотители, фокусирующие отражатели или линзы и т.д.

20.1. Резистивные микрофоны

В прошлом резистивные преобразователи давления довольно широко применялись в составе микрофонов. Такие преобразователи состояли из полупроводникового порошка (обычно графита), объемное удельное сопротивление которого менялось в зависимости от величины приложенного давления. Такие устройства обладали очень ограниченным динамическим диапазоном, плохими частотными характеристиками и высоким уровнем шума. Сейчас в некоторых микродатчиках также используется пьезорезистивный принцип преобразования.

20.2. Электростатические микрофоны

Такие устройства иногда называются конденсаторными или емкостными микрофонами.

Таким образом, электростатический микрофон преобразует расстояние между пластинами в электрический сигнал, который усиливается последующими электронными цепями. Очевидно, что для работы такого устройства необходим источник электрического заряда, от величины которого зависит чувствительность микрофона. Заряд может быть получен либо от внешнего источника питания, вырабатывающего напряжение в диапазоне 20...200 В, либо от внутреннего источника, способного выдавать аналогичный заряд, для чего в подложке микродатчика формируется электретный слой, представляющий собой поляризованный диэлектрический кристалл.

В настоящее время многие емкостные микрофоны реализуются на основе кремниевых диафрагм, которые преобразуют акустическое давление в перемещение и выполняют функцию подвижной пластины конденсатора. Для повышения чувствительности датчиков напряжение смещения должно быть максимально возможным; поскольку чем выше напряжение, тем больше отклонение диафрагмы. Однако это может привести к снижению динамического диапазона и надежности устройства.

20.3. Пьезоэлектрические микрофоны

Для разработки простых микрофонов может использоваться пьезоэлектрический эффект. Пьезоэлектрический кристалл является прямым преобразователем механического напряжения в электрический заряд. Наиболее часто используемым материалом для изготовления датчиков является пьезоэлектрическая керамика, которая может работать на очень высоких частотах. По этой причине пьезоэлектрические датчики применяются для преобразования ультразвуковых волн. Такие датчики также используются и в звуковом диапазоне, пьезоэлектрические микрофоны часто можно встретить в разнообразной аудиоаппаратуре.

20.4. Электретные микрофоны

Электретные материалы являются близкими родственниками пьезо- и пироэлектриков. На самом деле все они являются электретными материалами с ярко выраженными либо пьезоэлектрическими, либо пироэлектрическими свойствами. Электрет - это диэлектрический материал кристаллической структуры с постоянной электрической поляризацией. Электретные микрофоны – это электростатические преобразователи, состоящие из металлизированной электретной диафрагмы и металлической пластины, отделенных друг от друга воздушным зазором. Верхний слой металлизации и металлическая пластина соединяются друг с другом через резистор. Напряжение на этом резисторе усиливается и используется в качестве выходного сигнала микрофона.

Для работы в инфразвуковом диапазоне в металлической пластине электретных микрофонов прорезаются отверстия для выравнивания

давления. Также здесь часто требуется подача дополнительного напряжения смещения (как в емкостном микрофоне) для усиления поляризации.

Электретные микрофоны обладают высоким импедансом, поэтому интерфейсные схемы для работы с ними должны иметь высокий входной импеданс.

21. ДАТЧИКИ СВЕТА

Детекторы электромагнитных волн, лежащих в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до дальнего ИК излучений, называются световыми детекторами. С точки зрения разработчика датчиков поглощение фотонов чувствительным материалом приводит либо к повышению его температуры, либо к появлению новых квантовых частиц. Поэтому все детекторы световых излучений можно разделить на две группы: квантовые и тепловые преобразователи. Квантовые детекторы работают в интервале от УФ до среднего ИК диапазонов, в то время как тепловые датчики чаще используются в диапазонах среднего и дальнего ИК излучений, где их эффективность при комнатных температурах намного превышает эффективность квантовых преобразователей.

В основе практически всех твердотельных квантовых детекторов (фотовольтаических и фотопроводящих) лежит квантовая теория излучения, базирующаяся на взаимодействии отдельных фотонов с кристаллической решеткой полупроводниковых материалов. Их принцип действия основан на явлении фотоэффекта.

При сравнении характеристик разных фотодетекторов рассматриваются следующие параметры:

Эквивалентная мощность шума (ЭМШ) – это количество света, эквивалентное уровню собственного шума детектора. Другими словами, ЭМШ - это уровень света, необходимый для получения отношения сигнал/шум, равного единице.

Обнаруживающая способность детектора D^* определяется площадью его чувствительного элемента и эквивалентной мощностью шума:

$$D^* = \sqrt{\frac{\text{Площадь(см}^2\text{)}}{\text{ЭМШ}}}.$$

Длина волны среза – это максимальная рабочая длина волны спектральной характеристики, которая часто определяется как длина волны, при которой обнаруживающая способность падает на 10% от ее пикового значения.

Максимальный ток определяется для фотопроводящих детекторов, которые работают на постоянном токе. Рабочий ток никогда не должен превышать этого значения.

Максимальное обратное напряжение, превышение которого может привести к пробоем фотодетектора и к значительному ухудшению его рабочих характеристик.

Чувствительность – это отношение выходного фототока (или выходного напряжения) к мощности падающего излучения при заданной длине волны. Единицей измерения чувствительности является либо А/Вт, либо В/Вт

Поле обзора – угловая мера пространства, в котором датчик реагирует на излучение

Емкость перехода C – аналогична емкости конденсатора с параллельными пластинами. Ее необходимо учитывать при исследованиях быстродействующих процессов.

21.1. Фотодиоды

Фотодиоды - это полупроводниковые оптические датчики. Это понятие включает в себя даже солнечные батареи. В упрощенном виде принцип действия фотодиодов можно описать следующим образом. При воздействии излучения соответствующей частоты на прямо смещенный р-п переход (в котором положительный вывод батареи подключен к зоне р), ток через фотодиод возрастет незначительно по сравнению с темновым током. Другими словами, ток смещения в этом случае будет намного превышать ток, генерируемый светом. При обратном смещении р-п перехода ток возрастает очень сильно. Столкновение фотонов с поверхностью фотодиода приводит к образованию пар электрон-дырка на обоих концах перехода. При попадании электронов в зону проводимости, они начинают лететь в сторону положительного полюса батарей. Соответственно, созданный поток дырок направляется к отрицательному полюсу. Это означает появление в цепи фотодиода тока i_p . В темноте ток утечки i_0 не зависит от приложенного напряжения, а причиной его возникновения является тепловая генерация носителей зарядов.

Следует отметить, что электрический ток пропорционален оптической мощности падающего на детектор излучения.

Существуют два основных режима работы фотодиодов: фотоэлектрический и фотопроводящий. В первом случае к фотодиоду не прикладывается никакого напряжения смещения. Это приводит к отсутствию темнового тока, поэтому здесь присутствует только тепловой шум. Такой режим дает возможность получить наилучшую чувствительность при низких уровнях излучения. Однако из-за увеличения емкости перехода ухудшаются быстродействие диода и чувствительность к излучениям длинных длин волн.

На рисунке 21.1 показано включение фотодиода для работы в фотоэлектрическом режиме. Здесь диод выполняет роль токового генератора, вырабатывающего ток. Нагрузочный резистор R_b , стоящий на входе ОУ, определяет напряжение на выводах фотодиода и наклон нагрузочной характеристики.

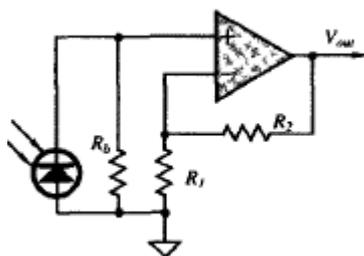


Рисунок 21.1 – Схема подключения фотодиода в фотоэлектрическом режиме

В быстродействующих устройствах использование фотодиода в фотоэлектрическом режиме невозможно (из-за его большой емкости перехода C).

Другой вариант такой схемы показан на рисунке 21.2. По своей сути эта схема является линейным преобразователем тока в напряжение. ОУ при помощи резистора ОС R_L преобразует ток диода в выходное напряжение. Конденсатор C' введен в схему для компенсации сдвига фаз. В идеальном усилителе напряжения на обоих входах ОУ должны иметь одинаковые значения, поэтому при таком включении инвертирующий вход иногда называется виртуальной землей. Таким образом, в этой схеме фотодиод работает при нулевом напряжении на его выводах, что позволяет предотвратить заряд конденсатора и улучшить линейность преобразователя.

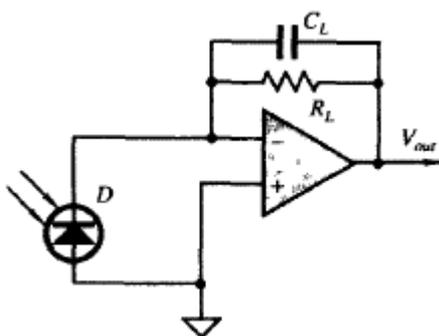


Рисунок 21.2 – Схема подключения фотодиода в качестве источника тока

При работе фотодиода в фотопроводящем режиме (рисунок 21.3) на него подается обратное напряжение смещения. Это ведет к расширению обедненной зоны, снижению емкости перехода, уменьшению последовательного сопротивления, сокращению времени нарастания сигнала и формированию линейной зависимости фототока от интенсивности излучений в широком диапазоне измеряемых значений. Однако при увеличении обратного смещения возрастает темповый ток, что ведет к усилению дробового шума.

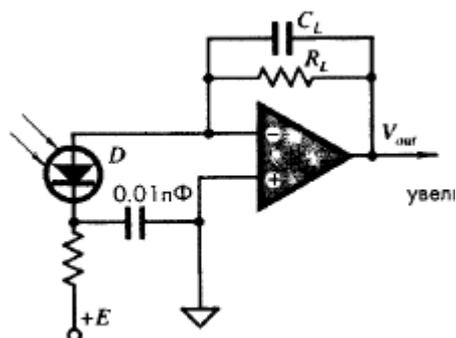


Рисунок 21.3 – Схема подключения фотодиода в фотопроводящем режиме

21.2. Фототранзистор

Фотодиод напрямую преобразует фотоны в носители зарядов – один фотон образует одну пару электрон-дырка. Фототранзисторы помимо фотоэлектрического преобразования выполняют функцию усиления тока, что значительно повышает чувствительность детектора. Переход коллектор-база является обратно смещенным диодом, работающим как описано в предыдущем разделе. При включении транзистора в схему с источником питания (батареей), внутри контура, в состав которого входит переход база-эмиттер, начинает течь фотоиндуцированный ток. Усиление тока в фототранзисторе происходит также как в традиционном биполярном транзисторе. В результате этого коллекторный ток значительно возрастает.

Фототранзисторы бывают двух типов: с двумя и тремя выводами. В последнем случае фототранзистор может использоваться не только как фоточувствительный элемент, но и как обычный биполярный транзистор. Однако в качестве фотодатчиков чаще применяются фототранзисторы с двумя выводами.

21.3. Фоторезисторы

Также как и фотодиод, фоторезистор является фотопроводящим устройством. Для изготовления фоторезисторов, как правило, применяется сульфид кадмия (CdS) и селенид кадмия (CdSe). Эти материалы являются полупроводниками, сопротивление которых меняется при попадании на их поверхность света, т.е. фотоэффект здесь заключается в изменении удельного сопротивления материала. Очевидно, что фоторезисторы необходимо подключать к источникам питания. На рисунке 21.4 показана схема фоторезистивного элемента. Из рисунка видно, что в нем на поверхности двух противоположных концов фотопроводника нанесены электроды. В темноте такой элемент имеет очень высокое сопротивление, и, следовательно, при подключении к нему источника напряжения темновой ток в цепи, наличие которого объясняется тепловыми явлениями, будет очень низким. При попадании света на поверхность фоторезистора, в цепи потечет ток.

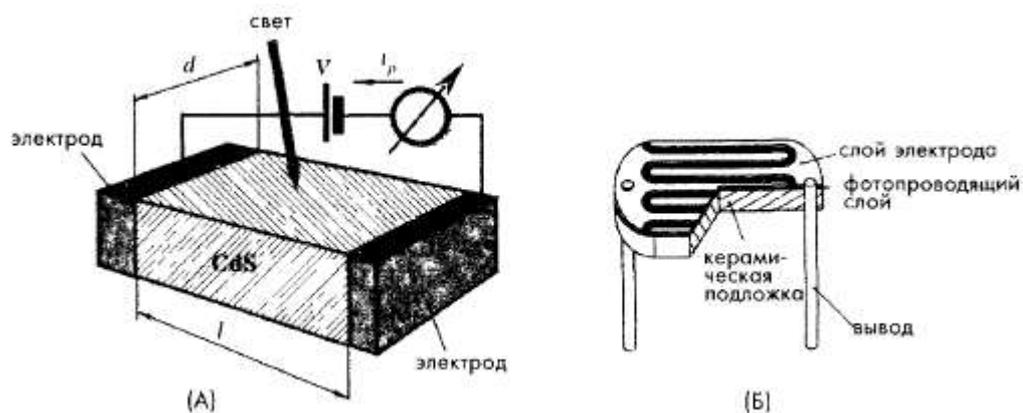


Рисунок 24 – Принцип действия (а) и типичная конструкция (б) фоторезистора

22. ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Химические датчики реагируют либо на определенные химические вещества, либо на химические реакции. Их назначение – идентификации и количественное определение химических реагентов в газовой и жидкой фазах (химические датчики для твердых веществ практически не используются).

В научных и прикладных исследованиях химические датчики используются во многих областях: от мониторинга загрязнения атмосферы до обнаружения взрывчатых веществ. Такие датчики применяются для проведения регулярных анализов образцов газов в лабораторных условиях и для определения распространения пятен опасных химических реагентов в почве или водоемах. Новые сферы применения химических датчиков – обнаружение местоположения насекомых – переносчиков опасных заболеваний, например, термитов по выделению ими газов в процессе переваривания клетчатки, а также мониторинг менструального цикла у коров для повышения эффективности искусственного оплодотворения.

В промышленности химические датчики используются для контроля за технологическими процессами при производстве пластмасс, а также при литье металлов, где количество диффундированных газов влияет на некоторые параметры металлов, например, на их прочностные характеристики. Они применяются для мониторинга среды в рабочих помещениях, для определения концентраций опасных для здоровья людей компонентов. Сфера применения химических датчиков постоянно растет: тестирование и контроль за качеством продуктов питания, за распространением пестицидов в сельском хозяйстве и т.д.

В медицине химические датчики применяются для тестирования состояния здоровья людей по анализам состава крови и газов, находящихся в легких. Такие датчики также используются при определении уровня алкоголя в крови и для диагностирования проблем пищеварения.

В военных областях химические датчики используются для обнаружения топливных складов и ядовитых веществ в воздухе, применяемых

при проведении военных операций. Такие датчики используются для мониторинга подземных вод на территории военных баз, а также для контроля за токсичностью многих производств, особенно ядерных, с целью исследования влияния тех или иных компонентов на окружающую среду и здоровье людей.

Характеристики химических датчиков

Для описания большинства химических датчиков используются общие для всех детекторов характеристики: стабильность, воспроизводимость, линейность, гистерезис, насыщение, время реакции и диапазон измерений. Но также существуют два параметра, характерные только для этой группы датчиков: избирательность и чувствительность к определенному химическому реагенту, входящему в состав сложных композиций.

Избирательность - это способность детектора реагировать только на определенное химическое вещество и не реагировать на все остальные. Чувствительность характеризуется либо минимальной концентрацией детектируемого вещества, либо минимальным изменением его концентрации (этот параметр часто называют разрешающей способностью), достаточных для надежного детектирования датчиком. Следует отметить, что если в предыдущих разделах синонимом термина «чувствительность» был наклон линейной передаточной функции, то для химических датчиков аналогом чувствительности является разрешающая способность.

Избирательность является самой важной характеристикой химических датчиков. На практике обычно проверяют реакцию датчиков на увеличение концентраций исследуемых реагентов, поскольку гораздо проще повышать концентрацию веществ в эталонном образце, чем уменьшать ее. Очевидно, что химических датчиков с идеальной селективностью не существует.

Основная проблема химических датчиков заключается в том, что исследуемые химические реакции меняют сам датчик. К сожалению, часто необратимо. Например, электрохимические элементы на основе жидких электролитов (материалов, проводящих электрический ток не за счет электронов, а при помощи ионов) при каждом измерении теряют небольшое количество электролита, поэтому надо либо постоянно доливать его, либо использовать датчики другого типа, такие как химические детекторы на основе полевых транзисторов.

Другой проблемой является то, что химические датчики могут подвергаться воздействию неограниченного количества различных комбинаций химических реагентов, все из которых просто невозможно смоделировать. При этом за счет загрязнений различных типов, либо забивающих поры пленочных детекторов, либо изменяющих чувствительную поверхность (например, кремний в циркониевых датчиках создает неудаляемую пленку) могут происходить серьезные изменения рабочих параметров датчиков, определенных в процессе калибровки.

Существует две классификации химических датчиков: по типу явления, лежащего в основе их принципа действия, и по методу измерения. Вес химических детекторы можно разделить на две большие группы: прямого измерения (простые) и косвенные (составные). Каждая группа, в свою очередь, делится на устройства химического и физического типа.

Датчики прямого действия основаны на свойствах некоторых химических реакций менять параметры электрической цепи: сопротивления, напряжения, тока или емкости. Такие датчики используют дополнительные схемы для согласования выходных электрических сигналов с интерфейсной схемой, но в них нет никаких преобразователей, конвертирующих одну форму энергии в другую. Датчики же косвенного типа основаны на химических реакциях, не вызывающих непосредственного изменения электрических параметров, поэтому в их состав всегда входят дополнительные преобразователи, конвертирующие побочные явления реакций (изменение физических размеров, сдвиг частоты, модуляцию света, изменение температуры и даже массы) в электрические сигналы.

В некоторых самых простых детекторах химического типа исследуемый химический реагент вступает в прямую химическую реакцию с чувствительным элементом, что вызывает значительное изменение их выходных сигналов. При этом часто возникают необратимые изменения самих датчиков и ухудшение их стабильности. Недостатком детекторов химического типа является их неполная восстанавливаемость после проведения измерений, вызванная частичным использованием их компонентов (уменьшение электролита в электрохимических элементах или размеров электродов).

В детекторах физического типа химические реакции не протекают, но в присутствии определенных химических реагентов происходит изменение их физических свойств. Детекторы этой группы обладают меньшим дрейфом характеристик и лучшей стабильностью по сравнению с датчиками химического типа. Однако, как правило, они достаточно дороги из-за необходимости использования дополнительных преобразователей и обладают невысоким быстродействием.

II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Лабораторная работа №1

Составление структурных схем измерительных преобразователей.

Цель работы:

1. Приобрести навыки анализа измерительных преобразователей.
2. Изучить принцип составления структурных схем.

Теоретические сведения.

При составлении структурной схемы измерительное устройство представляется в виде совокупности измерительных преобразователей, осуществляющих функциональные измерительные преобразования сигналов различной физической природы. Каждый измерительный преобразователь на структурной схеме отображается в виде блока, имеющего вход и выход. Вход и выход измерительного преобразователя подписываются обозначением соответствующей физической величины. Между собой измерительные преобразователи соединяются в порядке прохождения и преобразования измеряемой величины.

Как правило, измеряемая величина вначале преобразуется в вид, удобный для перевода в электрическую форму, далее происходит преобразование в напряжение (предпочтительнее) или ток. Полученный электрический сигнал проходит линеаризацию, здесь же может осуществляться компенсация внешних воздействий. После этого сигнал из аналоговой формы преобразуется в цифровую, как наиболее удобную для дальнейшей обработки и хранения.

Для примера можно привести структурную схему тензорезисторного датчика (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структурная схема тензорезисторного датчика

Измеряемое усилие F с помощью упругого элемента преобразуется в деформацию ΔL . Деформация упругого элемента воспринимается тензорезистором и преобразуется в изменение сопротивления тензорезистора ΔR , которое в измерительной схеме преобразуется в величину выходного напряжения. Эта структурная схема является общей для других тензорезисторных датчиков, у которых измеряемая величина с помощью тех или иных измерительных преобразователей преобразуется в силу. Такими преобразователями могут быть, например, мембрана для датчика давления или инерционная масса для датчика ускорений.

Ход выполнения:

1. Получить у преподавателя вариант задания в виде устройства или его чертежа с описанием.
2. Изучить принцип действия датчика.
3. Выделить первичный и промежуточные преобразователи.
4. Составить его структурную схему.
5. Записать выражение чувствительности для каждого звена.
6. На основе составленной структурной схемы предложить свой вариант исполнения измерительного преобразователя.

Лабораторная работа №2
Экспериментальное определение температурной характеристики
терморезистора

Цель работы:

1. Ознакомиться с методикой аппроксимации передаточной функции полупроводниковых терморезисторов.
2. Приобрести навыки экспериментального получения температурной зависимости терморезистора
3. Оценить точность полученной передаточной функции.

Основные теоретические сведения

Общие сведения о терморезисторах

Терморезисторами (термосопротивлениями) называются устройства, основное свойство которых заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Основным элементом термосопротивления является определенной формы проводник (металл) или полупроводник n- или p- типа электропроводности с двумя невыпрямляющими контактами.

Различают терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), сопротивление которых падает с возрастанием температуры, часто называемые термисторами, и терморезисторы с положительным ТКС, сопротивление которых увеличивается с возрастанием температуры. Такие терморезисторы называются позисторами.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой терморезисторов, в значительной степени, определяющей остальные характеристики этих изделий. Естественно, она аналогична температурной зависимости удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен данный терморезистор.

Уменьшение сопротивления материала с увеличением температуры обуславливается следующими причинами:

- увеличением концентрации носителей заряда;
- увеличением подвижности носителей заряда;
- фазовыми превращениями.

Материалы, из которых делают терморезисторы, должны удовлетворять следующим требованиям: чисто электронная проводимость материала и возможность регулирования ее, стабильность характеристик материала в диапазоне рабочих температур, простота технологии изготовления изделий. Материалы должны быть нечувствительными к загрязнениям в процессе технологического изготовления изделий.

Большое распространение получили CuO , Mn_3O_4 , Co_3O_4 , NiO и их смеси. На основе смесей оксидов меди и марганца получены полупроводниковые материалы с электропроводностью от 10^{-8} до 10^{-1} ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹.

Также используются окислы титана, ванадия, железа. При изменении соотношения компонентов соответствующих материалов получают заданные значения удельного сопротивления и ТКС.

По конструктивному оформлению терморезисторы можно разделить на следующие типы:

в виде цилиндрических стержней (КМТ-1, ММТ-1, КМТ-4, ММТ-4);

в виде дисков (СТ1-17, СТ3-17, СТ5-1);

в виде миниатюрных бусинок (СТ1-18, СТ1-19 и др.);

в виде плоских прямоугольников (СТ3-23).

В отличие от понятия «наименование» резистора, применяемого для его характеристики в конструкторской и товаропроизводительной документации, под маркировкой резистора понимают цифры, буквы и символы, наносимые на корпус резистора.

Маркировка содержит лишь самые необходимые и важнейшие сведения о резисторе. Обязательным показателем во всех случаях является номинальное сопротивление.

Характеристики и параметры терморезисторов

Основной характеристикой терморезистора является температурная зависимость его сопротивления. Она совпадает с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен терморезистор.

Для термисторов во всем рабочем диапазоне температур эта зависимость достаточно точно определяется соотношением

$$R_T = A \times e^{\left(\frac{\beta}{T}\right)}$$

где R_T – сопротивление терморезистора при температуре T , Ом

A – величина, зависящая от материала и геометрических размеров терморезистора,

β – постоянная, характеризующая физические свойства материала.

Записав такие выражения для двух температур T и T_0 и разделив одно на другое, можно исключить параметр A :

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Где R (Ом) – текущее сопротивление при температуре T (К),

R_0 (Ом) – сопротивление при температуре T_0 (К),

β (К) – постоянная, характеризующая физические свойства материала.

Полученное выражение не содержит постоянную величину A . Используя его можно рассчитать величину сопротивления терморезистора при любой температуре, если известны значение постоянной β и сопротивление при какой-нибудь определенной температуре T_0 .

Постоянную β называют коэффициентом температурной чувствительности терморезистора во всем рабочем интервале температур.

Сопротивление терморезистора R_0 при определенной температуре (обычно 20°C) – это номинальное сопротивление терморезистора.

Величину постоянной β легко определить экспериментально, измерив сопротивление терморезистора при двух температурах:

$$\beta = \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{T_2 \cdot T_1}{T_1 - T_2}$$

Кроме величин β и R_0 , терморезистор характеризуется следующими основными параметрами:

– температурный коэффициент сопротивления α_T . Он определяется как относительное изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры на один градус:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \times \frac{dR}{dT}$$

Или можно получить следующее соотношение, связывающее α_T с параметром β :

$$\alpha_T = -\frac{\beta}{T^2}$$

Из последней формулы следует, что зная постоянную β , можно вычислить α_T для любой температуры.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов в десятки раз больше, чем у металлических. Например, сопротивление платинового терморезистора при нагреве его от 0°C до 300°C меняется примерно в два раза. В то же время нетрудно изготовить такой полупроводниковый терморезистор, сопротивление которого при этом изменится в тысячу раз.

– постоянная времени τ , отражающая тепловую инерционность терморезисторов. Она равна времени, в течение которого превышение температуры рабочего тела терморезистора над окружающей средой при охлаждении его уменьшится в e ($\sim 2,7$) раз. Величина постоянной времени терморезистора может изменяться от десятых долей секунды до сотен секунд.

– предельно допустимая мощность рассеивания. При высоких температурах в полупроводниковом материале терморезистора могут происходить необратимые структурные изменения, в результате которых изменяются параметры прибора. Наибольшую температуру, при которой терморезистор сохраняет стабильность параметров при длительной эксплуатации, называют предельно допустимой. Соответствующую этой температуре мощность рассеяния называют максимальной (предельно допустимой) мощностью рассеяния. Обычно ее указывают для температуры окружающей среды 20°C .

- коэффициент рассеяния H , численно равный мощности, отводимой от терморезистора в окружающую среду при разности температур поверхности и окружающей среды в один градус.

Ход выполнения:

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера
2. Получить экспериментальную характеристику терморезистора. Для этого:
 - 2.1. Включить вольтметр и термометр.
 - 2.2. Переключить вольтметр в режим измерения сопротивления с диапазоном 100 кОм.
 - 2.3. Включить нагреватель.
 - 2.4. По мере роста температуры записывать в таблицу значения сопротивления R при указанной температуре нагревателя t .
 - 2.5. При достижении температуры 110 °С выключить нагреватель.
 - 2.6. Выключить вольтметр и термометр.
3. Рассчитать значение постоянной β для трех диапазонов температур: 20–50°С, 20–80°С, 20–110°С.
4. Рассчитать теоретические значения сопротивления терморезистора R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} при полученных значениях β .
5. Рассчитать значения относительных погрешностей для теоретически рассчитанных значений сопротивления терморезистора.

Таблица – Результаты измерений

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{ Ом}$	$R_{T1}, \text{ Ом}$	$R_{T2}, \text{ Ом}$	$R_{T3}, \text{ Ом}$	$\Delta R_{T1}, \%$	$\Delta R_{T2}, \%$	$\Delta R_{T3}, \%$
25							
30							
...							
110							

Лабораторная работа №3

Измерение перемещения трансформаторным индуктивным датчиком

Цель работы:

1. Ознакомиться с конструкцией трансформаторного индуктивного преобразователя.
2. Изучить принцип его работы и схему подключения.
3. Получить зависимость выходного напряжения от углового перемещения при различных значениях частоты сигнала возбуждения.

Основные теоретические сведения

Принцип работы трансформаторных (взаимоиндукционных) датчиков (ТД) перемещения основан на изменении коэффициента взаимоиנדукции двух обмоток при изменении параметров магнитной системы под действием измеряемой величины.

Они относятся к электромагнитным датчикам генераторного типа. Магнитные системы трансформаторных датчиков такие же, как и у индуктивных датчиков. Отличие заключается лишь в том, что добавляется еще обмотка, с которой и снимается выходной сигнал. Благодаря этому в трансформаторных датчиках отсутствует непосредственная электрическая связь между цепью питания и измерительной цепью. Существует связь лишь за счет магнитного поля (трансформаторная связь), что позволяет выбором числа витков выходной обмотки получить любой уровень выходного напряжения.

Простейший вариант трансформаторного датчика с односторонним зазором для измерения линейного перемещения приведен на рисунке 1.

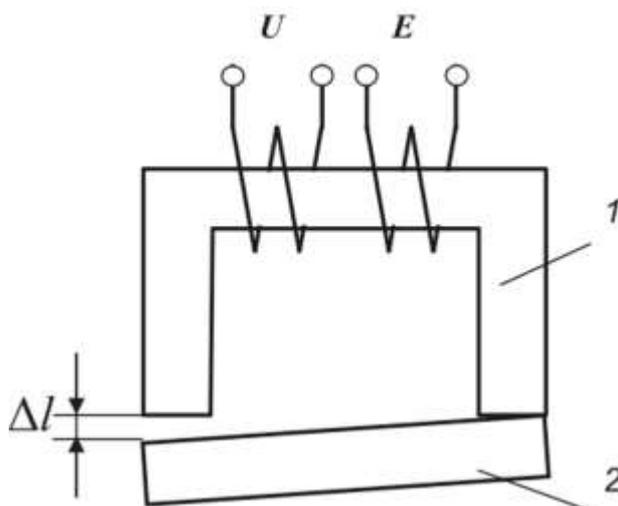


Рисунок 1 – Конструкция трансформаторного датчика

Магнитная система содержит якорь 2 и сердечник 1, на котором размещаются две катушки индуктивности (обмотки). Одна из них питается от источника переменного тока с напряжением U и является первичной, а в

другой (выходной или вторичной) возникает выходная ЭДС E . Ее значение зависит от величины воздушного зазора Δl . Максимальная ЭДС E получается при $\Delta l = 0$, поскольку при этом магнитное сопротивление замкнутого магнитопровода минимально и по нему проходит максимальный магнитный поток. С увеличением Δl уменьшаются магнитный поток и соответствующая ему ЭДС E . Такой датчик используется для измерения малых линейных перемещений, но имеет серьезный недостаток: зависимость ЭДС E от перемещения якоря x нелинейна и не проходит через нуль.

Наибольшее распространение получили дифференциальные трансформаторные датчики (ДТД), представляющие собой 2 трансформатора с общим подвижным якорем.

Трансформаторные датчики так же, как индуктивные, применяются в виде дифференциальных датчиков. Схематически конструкция дифференциального трансформаторного датчика показана на рисунке 2.

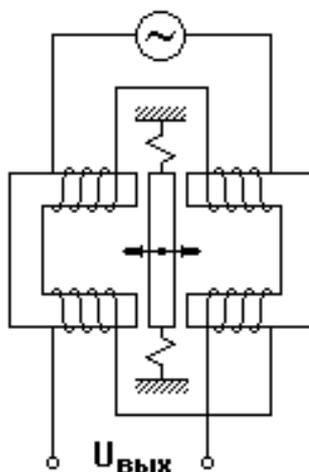


Рисунок 2 – Конструкция и подключение дифференциального трансформаторного датчика

Средний передвигной элемент (якорь) укреплен упруго, и при равенстве нулю измеряемой величины находится точно посередине воздушного зазора. Напряжения, возбуждаемые в частях вторичных обмоток, равны, и поскольку эти части обмоток включены встречно, выходное напряжение равно нулю. При воздействии измеряемой величины на якорь он перемещается вправо или влево, в результате чего изменяются коэффициенты взаимной индукции между частями первичной и вторичной обмоток, и на выходе появляется напряжение, соответствующее сдвигу якоря, а значит, и значению измеряемой величины.

Трансформаторные датчики могут быть использованы для измерения не только линейных, но и угловых перемещений.

Такой датчик (рисунок 3) содержит магнитопровод в виде рамки.

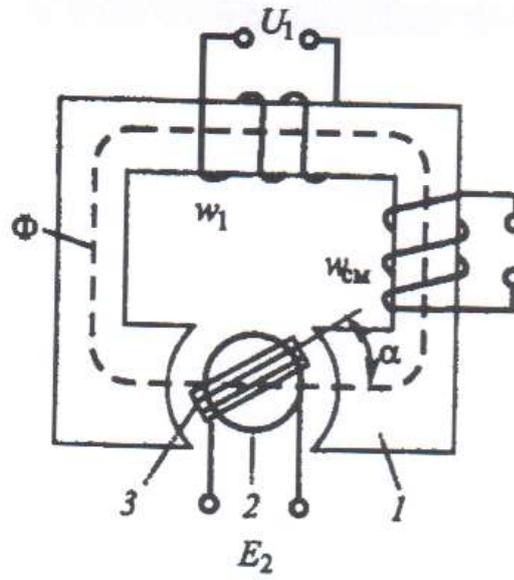


Рисунок 3 – Трансформаторный датчик углового перемещения

Магнитопровод датчика неподвижен и состоит из ярма 1 и сердечника 2. Обмотка возбуждения W_1 размещена на ярме 1, запитана переменным напряжением U_1 и создает в зазоре между ярмом 1 и сердечником 2 переменный магнитный поток Φ , амплитудное значение которого неизменно. В зазоре с равномерным распределением индукции размещена поворотная рамка 3 с вторичной обмоткой W_2 , в которой индуцируется ЭДС E_2 , являющаяся выходным сигналом датчика. В зависимости от угла поворота α E_2 изменяется от нуля (при $\alpha = 0$ плоскость рамки размещена вдоль направления магнитного потока) до максимального значения (при $\alpha = 90^\circ$ плоскость рамки размещена поперек направления магнитного потока, весь магнитный поток сцеплен с витками вторичной обмотки W_2). При изменении знака угла поворота α фаза ЭДС E_2 изменяется на 180° , т.е. датчик является реверсивным. В некотором диапазоне входного сигнала (угла поворота α) обеспечивается линейная зависимость $E_2 = f(\alpha)$.

Для измерения углового перемещения также применяют дифференциальную конструкцию (рисунок 4).

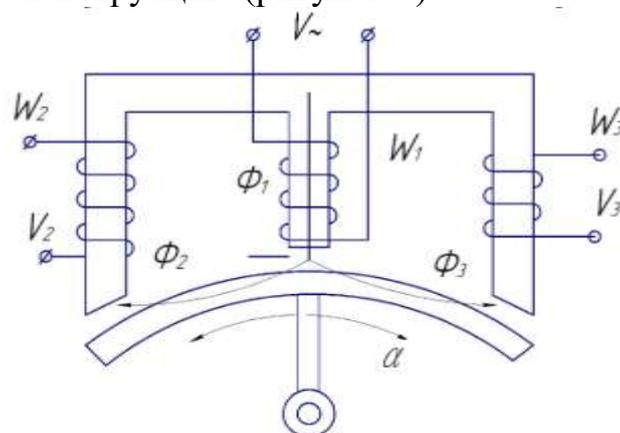


Рисунок 4 – Дифференциальный трансформаторный датчик углового перемещения

Ход выполнения:

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
 2. Включить осциллограф и генератор.
 3. Подключая осциллограф к входным и выходным контактам преобразователя, изменяя частоту и форму сигнала на генераторе, а также подбирая значение масштаба развертки на осциллографе, выполнить следующие измерения

3.1. Измерить амплитуду выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ при различных углах поворота α для трех значений частоты синусоидального сигнала возбуждения, занести значения в таблицу 1.

3.2. Зарисовать в таблицу 2 форму выходного сигнала для различной частоты и формы входного напряжения.

4. Выключить генератор и осциллограф.

5. Построить график зависимости $U_{\text{ВЫХ}}(\alpha)$ для синусоидального сигнала (по таблице 1).

Таблица 1 – Результаты измерений

	f = 500 Гц		f = 5000 Гц		f = 50000 Гц	
$\alpha, ^\circ$	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$
0						
5						
...						
60						

Таблица 2 – Форма выходного напряжения

Вид сигнала	Частота	Форма $U_{\text{ВХ}}$	Форма $U_{\text{ВЫХ}}$
Синусоидальный	500 Гц		
	5000 Гц		
	50000 Гц		
Треугольный	500 Гц		
	5000 Гц		
	50000 Гц		
Прямоугольный	500 Гц		
	5000 Гц		
	50000 Гц		

Лабораторная работа №4 Измерение перемещения реостатным преобразователем

Цель работы:

1. Ознакомиться с конструкцией реостатного преобразователя.
2. Изучить потенциметрическую схему подключения.
3. Получить зависимость сопротивления плеч реостата и выходного напряжения от линейного перемещения ползунка.

Основные теоретические сведения

Принцип работы

Реостатный датчик - это прецизионный (особо точный) реостат, движок которого перемещается под действием измеряемой величины. Входной величиной датчика является линейное или угловое перемещение движка, выходной - изменение его сопротивления.

На рисунке 1 схематически показаны некоторые варианты конструкций реостатов для линейного и углового перемещений.

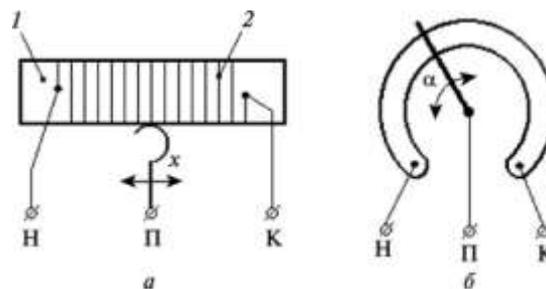


Рисунок 1 – Конструкции реостатов

Реостат состоит из каркаса 1, на который намотан провод 2, изготовленный из материала с высоким удельным сопротивлением. По проводу перемещается токосъемный движок (контактная щетка), который касается провода. Реостат имеет три вывода – начало и конец обмотки (Н и К) и контакт, соединенный с движком (П).

Реостат изображается в виде переменного резистора (рисунок 2), длина l которого соответствует длине обмотки реостата.

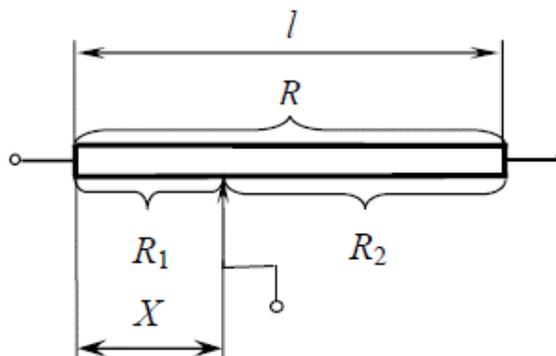


Рисунок 2 – Изображение и принцип работы реостата

Перемещение X обычно привязывают к перемещению движка реостата относительно начала или середины его обмотки.

Работа реостатного датчика основана на зависимости электрического сопротивления проводника от его длины. Если перемещение X отсчитывать относительно крайнего вывода реостата, т. е. начала обмотки, то с увеличением значения X пропорционально увеличивается число витков (W_1) на участке обмотки, принадлежащем X , увеличивается длина провода, соответствующая X , и сопротивление этого участка реостата (обмотки). Если обмотка реостата равномерная, и ее шаг (т. е. расстояние между соседними витками) равен l_0 , то на участке X имеем $W_1 = X/l_0$ витков, а вся обмотка реостата имеет $W = l/l_0$ витков.

При сопротивлении одного витка, равном R_0 , получается:

$$R_1 = W_1 R_0 = \frac{X}{l_0} R_0$$

Сопротивление всей обмотки реостата

$$R = W R_0 = \frac{l}{l_0} R_0$$

Таким образом

$$R_1 = \frac{X}{l} R$$

То есть значение R_1 пропорционально как абсолютному, так и относительному перемещению.

Схема подключения

Поскольку реостатный датчик является параметрическим датчиком, то для преобразования изменения сопротивления R_1 в изменение тока или напряжения требуется измерительная цепь. Наибольшее распространение получила потенциметрическая схема включения реостатного преобразователя, в которой реостат включают по потенциметрической схеме (рисунок 3), являющейся частным случаем схемы делителя напряжения.

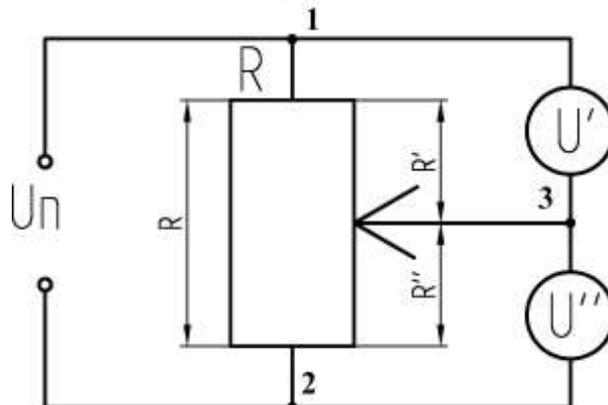


Рисунок 3 – Потенциметрическая схема включения реостата

Переменный резистор, включаемый по схеме делителя напряжения, называют потенциометром. поэтому такой датчик иногда называют потенциометрическим.

Если общее сопротивление R остается постоянным, как в случае использования реостата в качестве делителя напряжения, то выходное напряжение делителя зависит от значения напряжения U_{Π} и соотношения между сопротивлением с которого снимают выходное напряжение и общим сопротивлением R , к которому подключено U_{Π} . От абсолютных значений R' и R'' значение выходного напряжения не зависит. В качестве выходного можно использовать напряжение любого плеча реостата (U' или U'' , соответствующие плечам R' или R'').

Численно значение выходного напряжения определяется

$$U' = \frac{R'}{R} \times U_{\Pi} \quad \text{и} \quad U'' = \frac{R''}{R} \times U_{\Pi} \quad \text{для первого и второго плеча}$$

соответственно. Сопротивления плеч реостата и их выходные напряжения изменяются симметрично, то есть при движении движка в одну сторону значения R' и U' увеличиваются, а значения R'' и U'' уменьшаются, и наоборот.

Общее напряжение U_{Π} подаваемое на реостат распределяется на его плечах т. е. напряжение U_{Π} делится на две части, пропорциональные сопротивлениям этих резисторов. Поэтому такая цепь и называется делителем напряжения. Соответственно:

$$U_{\Pi} = U' + U''$$

$$R = R' + R''$$

При практическом использовании датчика важно, чтобы мощность, потребляемая им от источника питания, была минимальна. Для уменьшения этой мощности следует снижать значение тока т. е. увеличивать сопротивление R . Поэтому датчики обычно выполняют высокоомными, их обмотки изготавливают из константана, нихрома, манганина и других металлов и сплавов, имеющих высокое удельное сопротивление.

Во многих случаях к выходным клеммам датчика подключена некоторая нагрузка с сопротивлением $R_{\text{н}}$. Такой нагрузкой может быть измерительный прибор (вольтметр), входное сопротивление усилителя и т. д. При подключении нагрузки значение выходного напряжения может измениться по сравнению с напряжением, соответствующим ненагруженному датчику, а характеристика $U_{\text{вых}} = f(I)$ будет отличаться от линейной. Чтобы этого не происходило должно выполняться условие $R_{\text{н}} \gg R$.

Ход выполнения:

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Включить вольтметр.
3. Переключить вольтметр в режим измерения сопротивления с диапазоном 1 кОм.

Лабораторная работа №5

Измерение сопротивления методом уравновешенного моста

Цель работы:

1. Ознакомиться с конструкцией реохордного преобразователя.
2. Изучить принцип работы мостовой схемы.
3. Изучить метод измерения сопротивления с помощью уравновешенного моста.
4. Получить зависимость сопротивления реохорда от линейного перемещения ползунка.

Основные теоретические сведения

Принцип работы мостовой схемы.

Мостовая схема – схема соединения элементов электрической цепи (сопротивлений, выпрямительных диодов и т.д.), характеризующаяся наличием мостовой ветви между двумя точками схемы, не соединенными непосредственно с источником электрической энергии. В основу измерительной мостовой схемы положена схема моста Уитстона (рисунок 1).

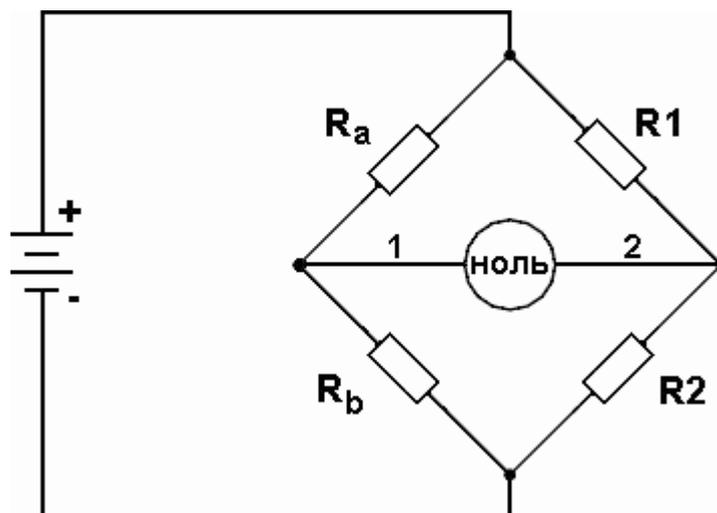


Рисунок 1 – Мостовая схема

Когда напряжение между точками 1 и 2 равно нулю, то индикатор баланса будет показывать ноль, и такой мост называется сбалансированным. Состояние баланса моста полностью зависит от отношений R_a/R_b и R_1/R_2 , и оно не зависит от напряжения питания. Для измерения сопротивлений с помощью моста Уитстона на место резисторов R_a или R_b устанавливается неизвестное сопротивление, в то время как остальные три резистора являются прецизионными и их номинал известен. В качестве индикатора баланса может использоваться как вольтметр, так и амперметр.

Измерение неизвестного сопротивления с помощью мостовой схемы может осуществляться двумя методами: неуравновешенного и уравновешенного моста.

При первом методе после подключения к мосту неизвестного сопротивления измеряется напряжение разбалансировки моста $U_{\text{вых}}$ и по известным значениям остальных сопротивлений и напряжения питания $U_{\text{п}}$ вычисляется искомое сопротивление, при этом:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \times \frac{R_b \times R_1 - R_a \times R_2}{(R_a + R_b) \times (R_1 + R_2)}$$

При методе уравновешенного моста после подключения к мосту неизвестного сопротивления значения прецизионных резисторов моста подбираются таким образом, чтобы мост уравновесился. Искомое сопротивление вычисляется исходя из уравнения равновесия моста:

$$R_a \times R_2 = R_b \times R_1$$

Достоинствами данного метода измерения являются линейность, высокая чувствительность и точностью (благодаря возможности применения точных средств измерения выходного напряжения с малым диапазоном), независимость измерения от напряжения питания, отсутствие влияния сопротивления измерительного прибора на результат.

Мосты считаются превосходным средством измерения сопротивления среди остальных схем. Но их отличием является нелинейность (и имеющих нелинейные шкалы), и связанные с этим погрешности измерений, мостовая схема является линейной (математика описания её работы основана на простых отношениях и пропорциях) и довольно точной.

Имея стандартные сопротивления достаточной точности и нуль-детектор с необходимой чувствительностью, достижимая точность измерения сопротивления может быть не хуже $\pm 0,05\%$ при использовании моста Уитстона. Это метод измерения сопротивления предпочитают использовать в калибровочных лабораториях из-за его высокой точности.

Существует много вариаций основной схемы моста Уитстона. Большинство мостов постоянного тока используются для измерения сопротивления, в то время как мосты переменного тока могут быть использованы для измерения различных электрических величин, таких как индуктивность, ёмкость и частота.

Интересным вариантом моста Уитстона является двойной мост Кельвина, используемый для измерения очень малых сопротивлений (обычно менее $1/10$ Ома), его схема изображена на рисунке 2:

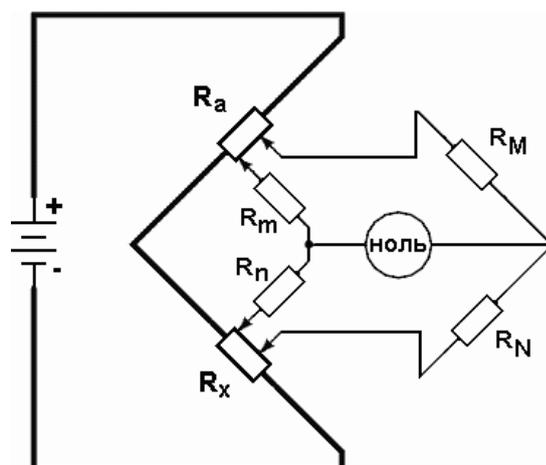


Рисунок 2 – Схема четырехпроводного моста

Низкоомные резисторы на рисунке изображены толстой линией, так же, как и проводники, соединяющие их с источником напряжения, обеспечивающим сильный ток. Принцип работы этого измерительного моста состоит в разделении силовой ($R_a - R_x$) и измерительной ($R_m - R_n - R_x$) цепей, что позволяет исключить из измерения сопротивление соединительных проводов, которое может быть даже больше измеряемого.

Описание реохордного преобразователя

Принцип действия реохордных преобразователей (рисунок 3) аналогичен реостатным, и заключается в перемещении щетки с контактом вдоль проводника с изменением сопротивления между щеткой и концами этого проводника. В качестве проводника также используется металлическая проволока, но в отличие от реостатов, в реохордах проволока просто натянута по направлению перемещения.

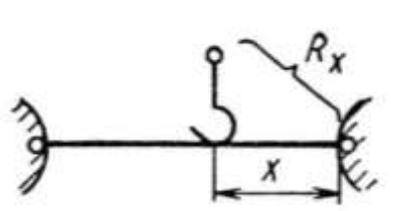


Рисунок 3 – Конструкция реохорда

У таких преобразователей отсутствует погрешность дискретизации, они обладают лучшим контактом между щеткой и чувствительным элементом (проволокой), однако полное сопротивление и чувствительность у них гораздо ниже, чем у реостатов.

Из-за малого сопротивления, реохордные преобразователи подключаются не напрямую в плечи моста, а в качестве добавочных сопротивлений. Часто реохорды используются со специальными схемами, предназначенными для измерения малых сопротивлений, например, четырехпроводным мостом.

Ход выполнения:

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Включить блок питания моста.
3. Установить движок реохорда в крайнее левое положение.
4. Подобрать значение сопротивлений плеч моста (вращая ручки), при котором мост будет сбалансирован, стрелка индикатора в состоянии баланса будет находится в нулевом положении.
5. Записать в таблицу значение сопротивлений плеч моста R_M (по индикаторам на ручках).
6. Повторить п.4–5 для следующих положений движка согласно таблице.
7. Выключить блок питания моста.
8. Рассчитать значения сопротивлений реохорда для каждого положения движка и занести значения в таблицу. При расчете пользоваться формулой $R = R_M \times \frac{N}{a}$, где N и a – коэффициенты, определяемые положением перемычек моста.
9. Построить график зависимости $R = f(x)$.
10. Определить и записать в отчет полное сопротивление реохорда $R_{\text{п}} = R(360) - R(0)$.

Таблица – Результаты измерений

х, мм	R_M , Ом	R, Ом
0		
10		
...		
360		

Лабораторная работа №6 Расчет силоизмерительного элемента

Цель работы:

1. Приобрести навыки расчета упругих силоизмерительных элементов.
2. Изучить вид функции преобразования упругой балки равного сопротивления с тензорезистором.

Основные теоретические сведения

Для измерения силы и взаимосвязанных с ней физических величин (массы, давления, крутящего момента и т.п.) используются тензометрические преобразователи (тензопреобразователи, тензодатчики). Они состоят из упругого элемента, который деформируется под воздействием измеряемой величины, и измерительного элемента, преобразующего эту деформацию в электрический сигнал. Входной величиной для измерительного элемента может быть как деформация (перемещение точек, лежащих на поверхности упругого элемента), так и перемещение характерных точек упругого элемента в направлении, задаваемом, направлением действия нагрузки. Измерение перемещения происходит преобразователями перемещения, предназначенными для работы с малыми величинами (емкостными или индуктивными).

По принципу работы измерительные элементы деформации можно разделить на следующие виды:

- тензорезистивные;
- пьезоэлектрические;
- оптико-поляризационные;
- волоконно-оптические;
- пьезорезистивные.

Наиболее распространенным видом измерительных элементов являются тензорезистивные (тензорезисторы), которые при деформации изменяют свое электрическое сопротивление.

При численном расчете функции преобразования тензодатчика основным является расчет упругого элемента, то есть определение зависимости его деформации (или перемещения) от приложенной силы.

Типичным тензодатчиком является балка равного сопротивления с наклеенным на ее поверхность тензорезистором (рисунок 1).

В зависимости от конструкции, требуемых характеристик и схемы подключения тензорезисторов может быть несколько. Тензорезисторы, находящиеся по разные стороны балки испытывают деформации разных знаков.

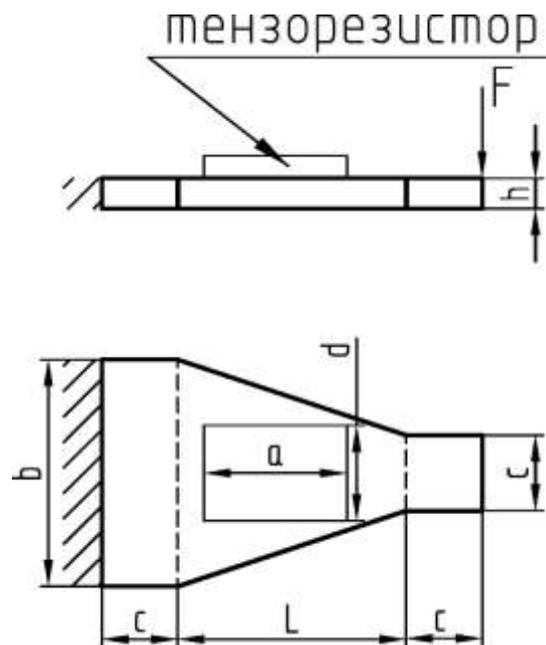


Рисунок 1 – Конструкция балки равного сопротивления с тензорезистором

Исходные данные

Расчетные формулы (все величины в размерностях СИ):

– относительная деформация балки равного сопротивления:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot L}{h \cdot S \cdot E} \cdot F, \text{ где } L \text{ – длина рабочей части балки, } h \text{ – толщина балки, } S \text{ –}$$

площадь сечения в широкой части, E – модуль упругости материала, F – приложенная к концу балки сила.

– механическое напряжение в балке:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E.$$

– изменение сопротивления тензорезистора:

$\Delta R = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon$, где R_0 – начальное сопротивление, k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Размеры балки выбираются исходя из следующих ограничений:

– в рабочую часть балки должен вписываться тензорезистор размерами $a \cdot d = 10 \cdot 5$ мм;

– размеры крепежных зон $c = 5$ мм;

– относительная деформация ε не должна превышать 0,3% (предел прочности тензорезисторов), но быть как можно ближе к этому значению (для повышения чувствительности);

– механическое напряжение балки не должно превышать значения предела прочности при растяжении σ_B и условного предела текучести для материала $\sigma_{0,2}$ с принятым коэффициентом запаса 2, но быть как можно ближе к этим значениям.

22.1. Варианты заданий:

Вариант	Материал	Е, ГПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	F, Н	R ₀ , Ом	k
1	30ХГСА	198	1100	850	10	200	2
	45	200	470	245			
2	36НХТЮ	180	1150	750	15	200	2
	20	200	350	175			
3	ШХ15	210	2200	1700	45	200	2
	40Х	200	655	490			
4	30ХГСА	198	1100	850	30	200	2
	45	200	470	245			
5	ШХ15	210	2200	1700	10	100	1
	20	200	350	175			
6	36НХТЮ	180	1150	750	60	100	1
	40Х	200	655	490			
7	30ХГСА	198	1100	850	20	100	1
	45	200	470	245			
8	ШХ15	210	2200	1700	30	100	1
	40	200	430	215			
9	36НХТЮ	180	1150	750	40	200	1
	20	200	350	175			
10	65Г	210	1710	1460	15	200	1
	45	200	470	245			
11	36НХТЮ	180	1150	750	20	200	1
	40Х	200	655	490			
12	30ХГСА	198	1100	850	30	200	1
	20	200	350	175			
13	ШХ15	210	2200	1700	10	200	4
	45	200	470	245			
14	36НХТЮ	180	1150	750	50	200	4
	40	200	430	215			
15	ШХ15	210	2200	1700	20	200	4
	40Х	200	655	490			
16	30ХГСА	198	1100	850	30	200	4
	45	200	470	245			

Задание:

По исходным данным для двух материалов:

- выбрать размеры балки равного сопротивления,
- составить функцию преобразования $\Delta R = f(F)$,
- по значениям F (от 0 до заданного) построить график $\Delta R = f(F)$.

Лабораторная работа №7
Расчет мостовых измерительных схем

Цель работы:

1. Приобрести навыки составления и расчета мостовых измерительных схем.
2. Изучить вид функции преобразования мостовой измерительной схемы.

Основные теоретические сведения

Для работы с тензорезисторами, как правило, используется мостовая схема (мост Уитстона), приведенная на рисунке. Она позволяет преобразовать изменение сопротивления тензорезистора в напряжение. Ее достоинствами являются получение на выходе нулевого напряжения при нулевой деформации тензорезисторов, возможность включения в нее нескольких тензорезисторов, работающих как совместно (испытывающих деформацию одного знака), так и дифференциально (испытывающих деформацию разных знаков), а также возможность обеспечения термокомпенсации схемы.

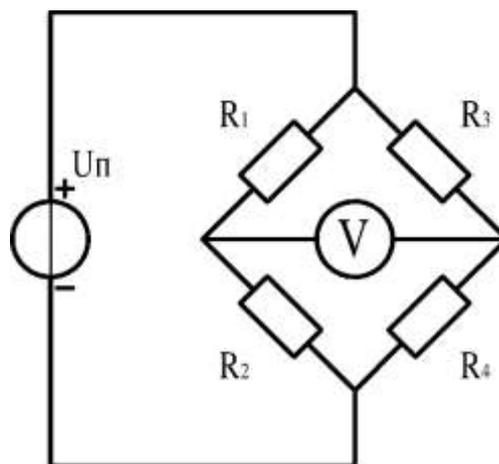


Рисунок – Мостовая схема

При использовании мостовой схемы часть сопротивлений являются резистивными измерительными преобразователями, оставшиеся – постоянными резисторами.

В простых силоизмерительных устройствах измерение осуществляется методом неуравновешенного моста. При данном методе мостовая схема при равенстве измеряемой величины нулю (при котором входящие в мостовую схему резистивные измерительные преобразователи имеют некоторое начальное сопротивление R_0) находится в уравновешенном состоянии, то есть напряжение на ее выходе равняется нулю.

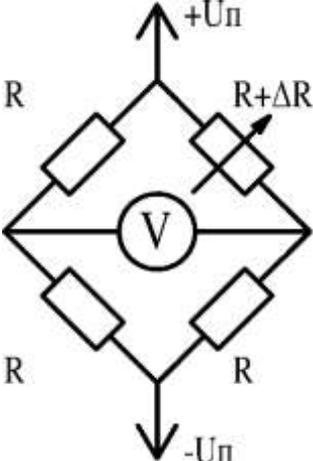
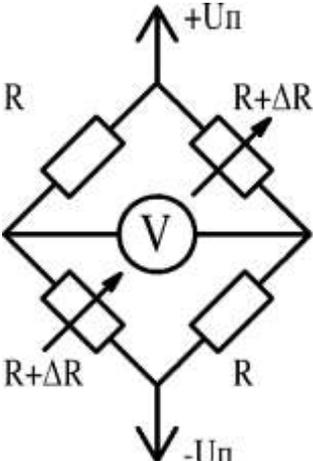
Уравновешенное состояние мостовой схемы происходит при выполнении следующего соотношения:

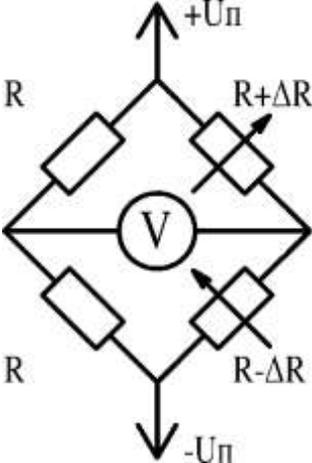
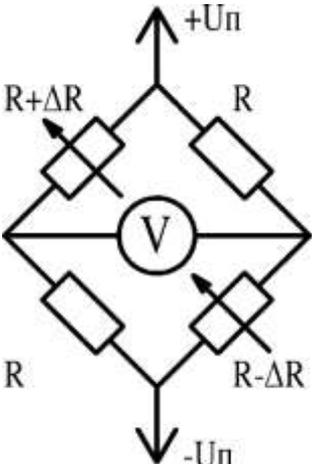
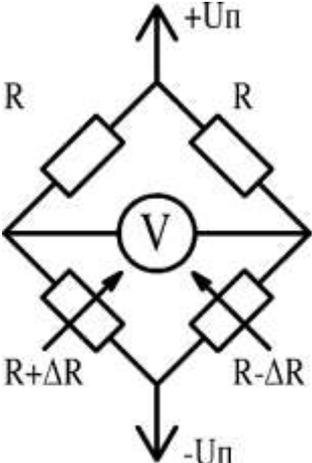
$$R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$$

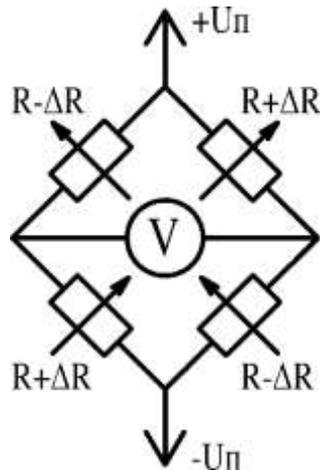
При изменении измеряемой величины (и, соответственно, сопротивления резистивных измерительных преобразователей) схема выходит из уравновешенного состояния, на выходе появляется напряжение. По значению этого напряжения рассчитывают значение измеряемой величины.

Мостовая схема, в зависимости от количества и типа применяемых резистивных преобразователей, может использоваться в конфигурациях, приведенных в таблице:

Таблица – Возможные конфигурации мостовой схемы

№	Схема	Значение выходного напряжения
10.	 <p>The diagram shows a diamond-shaped Wheatstone bridge. The top-left arm has a resistor labeled 'R'. The top-right arm has a resistor labeled 'R+ΔR' with an arrow pointing to it, indicating a change. The bottom-left arm has a resistor labeled 'R'. The bottom-right arm has a resistor labeled 'R'. A voltmeter labeled 'V' is connected across the horizontal bridge. At the top vertex, an arrow points upwards and is labeled '+Uπ'. At the bottom vertex, an arrow points downwards and is labeled '-Uπ'.</p>	$U_{\pi} \times \frac{\Delta R}{2(2R + \Delta R)}$
11.	 <p>The diagram shows a diamond-shaped Wheatstone bridge. The top-left arm has a resistor labeled 'R'. The top-right arm has a resistor labeled 'R+ΔR' with an arrow pointing to it. The bottom-left arm has a resistor labeled 'R+ΔR' with an arrow pointing to it. The bottom-right arm has a resistor labeled 'R'. A voltmeter labeled 'V' is connected across the horizontal bridge. At the top vertex, an arrow points upwards and is labeled '+Uπ'. At the bottom vertex, an arrow points downwards and is labeled '-Uπ'.</p>	$U_{\pi} \times \frac{\Delta R}{2R + \Delta R}$

12.		$U_n \times \frac{\Delta R}{2R}$
13.		$U_n \times \frac{\Delta R^2}{(2R + \Delta R)(2R - \Delta R)}$
14.		$U_n \times \frac{2R}{(2R + \Delta R)(2R - \Delta R)}$

15.		$U_{\text{п}} \times \frac{\Delta R}{R}$
-----	---	--

В схемах: R – добавочные сопротивления, представляющие собой постоянные резисторы, их значение не зависит от измеряемой величины и остается неизменным в процессе измерения; $R+\Delta R$ – резистивные преобразователи (в контексте данной работы тензорезисторы), сопротивление которых увеличивается при увеличении измеряемой величины; $R-\Delta R$ – резистивные преобразователи (в контексте данной работы тензорезисторы), сопротивление которых уменьшается при увеличении измеряемой величины.

При составлении схемы добавочные сопротивления подбираются таким образом, чтобы при нулевом значении измеряемой величины мост находился в сбалансированном состоянии.

Задание:

- составить мостовую схему для четырех заданных вариантов резистивных преобразователей (по численным данным лабораторной работы №6)
- рассчитать выходное напряжение схемы для пяти значений сопротивления преобразователей (два крайних и три промежуточных)
- построить график зависимости выходного напряжения схемы от сопротивления преобразователей

Варианты резистивных преобразователей:

1. Одиночный тензорезистор.
1. Два тензорезистора, работающих совместно.
3. Два тензорезистора, работающих дифференциально.
4. Четыре тензорезистора, из которых два работают совместно и два дифференциально к ним.

Во всех случаях напряжение питания моста принимать 15 В.

Лабораторная работа №8
Исследование логометрической схемы подключения реостатных
первичных измерительных преобразователей

Цель работы

1. Изучить принцип действия резистивных первичных измерительных преобразователей (РПИП).
2. Изучить электрические схемы промежуточных преобразователей (ПП), работающих с РПИП.
3. Получить характеристики резистивного первичного преобразователя и электрической схемы.

Теоретические сведения

Общие сведения о резистивных первичных измерительных преобразователях

Резистивные первичные измерительные преобразователи (РПИП) служат для преобразования изменений неэлектрических величин в изменение электрического сопротивления. Широкое распространение этих элементов приборов обусловлено главным образом следующими причинами:

- простотой конструкции преобразователя;
- простотой электрических схем, реагирующих на изменение активного сопротивления. Выходной сигнал некоторых преобразователей можно подавать без усиления на показывающее, регистрирующее или другое устройство;
- возможностью использовать для преобразования различных неэлектрических величин в электрические в приборах точной механики.

Принцип действия РПИП основан на использовании зависимости активного сопротивления R от длины проводника l , площади его поперечного сечения F и удельного электрического сопротивления ρ , которые изменяются под внешним воздействием, подлежащим измерению (деформации, давления, усилия, температуры, влажности, скорости потока газа, освещенности и др.)

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

В реохордных и реостатных ПИП под действием перемещения изменяется величина l , в тензорезисторах (лат. *tensus* - напряженный) при деформации проводника изменяются все три параметра, в терморезисторах, в термоанемометрах - измерителях скорости ветра (греч. *onemus* - ветер), гигрометрах - измерителях влажности (греч. *hygros* - влажный), пьезорезисторах (греч. *pieso* - давлению) - измерителях давления, магниторезисторах и фоторезисторах изменяется величина ρ .

РПИП изготавливаются из металлов (тензорезисторы, реохордные, реостатные, терморезисторы, термоанемометры) и полупроводников (тензорезисторы, терморезисторы, фоторезисторы, гигрометры, магниторезисторы).

Принцип действия реостатных первичных измерительных преобразователей

Входной величиной реостатного преобразователя является линейное или угловое перемещение движка, а выходной — меняющееся сопротивление.

Для преобразования измеряемой механической величины в перемещение движка реостатного преобразователя используют различные преобразователи механического сигнала. Например, при измерении давления могут быть использованы такие механические упругие преобразователи, как мембраны, сильфоны, трубки Бурдона, спиральные и винтовые трубки с внутренним давлением и др. Широко применяют различного рода вспомогательные элементы, например, рычаги, редукторы для измерения масштабов перемещений.

Эти перемещения могут быть связаны с положением частей машин, станков, уровня жидкости, мембраны под действием давления жидкости, инерционной массы под действием ускорения и других механических параметров.

Реостатный преобразователь (рисунок 1а) состоит из каркаса 1, на который намотана изолированная проволока 2. По верхней грани каркаса, часть боковой поверхности которого показана на рисунке 1б, скользит щетка 3 движка реостата. Изоляция проволоки для обеспечения электрического контакта зачищена. Напряжение питания преобразователя подают к двум крайним зажимам, выходную величину снимают между одним из крайних зажимов и средним зажимом, соединенным с токосъемным кольцом 4, по которому скользит щетка 5. Приводной валик 6 электрически изолирован от остальных элементов движка.

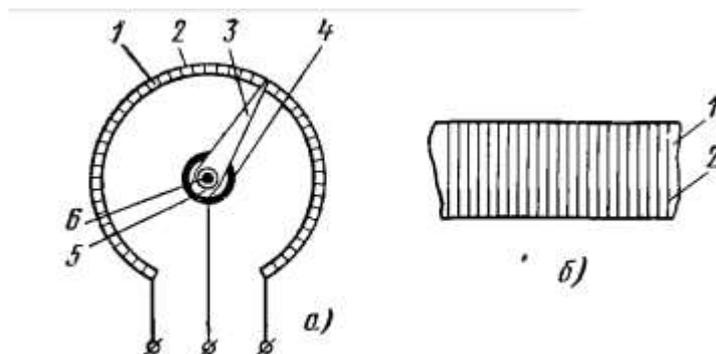


Рисунок 1 – Схема устройства (а) и каркас (б) реостатного преобразователя

Преимуществом реостатных датчиков является возможность получения достаточно большого выходного сигнала, причем реостатный преобразователь датчика может питаться как постоянным, так и переменным током. Реактивное сопротивление реостатного преобразователя весьма мало (малы собственные индуктивности и емкости) в диапазоне частот, верхняя граница которого составляет несколько килогерц.

Большая величина выходного сигнала часто позволяет проводить дальнейшую его обработку и регистрацию без применения дополнительных усилительных устройств, снижающих точность результатов измерений.

Динамические свойства потенциометрических датчиков невысоки, поэтому их применяют для измерения статических или медленно меняющихся величин.

Каркасом реостата служат диэлектрики (гетинакс, пластмассы, керамика и др.), изготовленные в виде пластины, цилиндра, тора и более сложных по форме деталей. Провод должен быть изолирован эмалью или оксидной пленкой. После намотки провода на каркас в местах контакта щетки движка изоляция счищается.

Наилучшим материалом для обмоточной проволоки служит сплав платины и иридия (90% *Pt*, 10% *Ir*). Добавка иридия к платине увеличивает удельное электрическое сопротивление ($\rho = 0,23 \times 10^{-6}$ Ом/м), понижает температурный коэффициент электрического сопротивления, повышает твердость, прочность, кислотоупорность. При диаметре провода 0,03 мм изготавливаются реостаты с размерами 1×2 см и сопротивлением до нескольких тысяч Ом. Недостаток этого сплава - высокая стоимость.

Более часто в реостатных преобразователях используются нихром, константан и фехраль. При высоких температурах используется нихром и фехраль.

Диаметр проволоки обычно колеблется от 0,03 до 0,3 мм. Стремление к миниатюризации приводит к использованию проволоки диаметром 0,01 мм.

При выборе материала каркаса учитывают его диэлектрические, антикоррозионные и антимагнитные свойства. Если требования к жесткости и точности размеров невысоки, то применяют различные неметаллические материалы: текстолит, гетинакс, эбонит, органическое стекло, прессованную керамику. Недостатки неметаллических материалов: гигроскопичность, низкая теплопроводность и теплоемкость.

В случае высоких требований к жесткости и точности применяют каркасы из алюминиевых сплавов АМг, Д1, Д16 и др. Металлические каркасы изолируют различными лаками (в ряде случаев с предварительным анодированием).

Важное значение в резистивных преобразователях имеет устойчивый контакт между токоъемным элементом движка и обмоткой, малое переходное сопротивление контакта и его стабильность. Качество контакта определяется главным образом применяемыми материалами. Материал щетки движка должен быть износоустойчивым, легко обрабатываться. При изготовлении щеток из благородных металлов приходится мириться с нестабильностью переходного сопротивления, которая вызывается перепадами температуры, влиянием примесей, содержащихся в воздухе, образованием оксидных пленок. Лучшими материалами являются благородные металлы (платина, палладий, иридий) и их сплавы (платина-иридий, палладий-иридий). Щетка может быть выполнена из нескольких жил проволоки или пакета пластин, часто также

используют стержни цилиндрической формы. Качество контакта между щеткой и обмоткой зависит от контактного давления, изменяющегося от 0,03...0,005 (для проволочек), и до 0,05...0,1Н (для пластин) в зависимости от условий работы преобразователя и материалов контакта и обмотки.

Надежность контакта обеспечивают применением высокого качества материалов, чистотой контактных поверхностей, защитой от загрязнений, достаточным контактным давлением, стойкостью материалов против истирания.

Большинство реостатных измерительных преобразователей имеют равномерную намотку, поэтому их статическая характеристика близка к линейной:

В реостатных ПИП изменение сопротивления при перемещении щетки происходит скачкообразно со ступенями, соответствующими сопротивлению одного витка. В этом случае максимальная погрешность преобразования определяется отношением сопротивления одного витка к полному сопротивлению обмотки реостата. Для уменьшения погрешности необходимо уменьшать диаметр провода и увеличивать число витков. Одновременно при этом уменьшается сопротивление перемещению щетки.

Если необходимо исключить скачкообразность изменения сопротивления, то применяются реохордные ПИП (рисунок 2), у которых щетки скользят вдоль провода, но у таких преобразователей значительно меньше чувствительность.

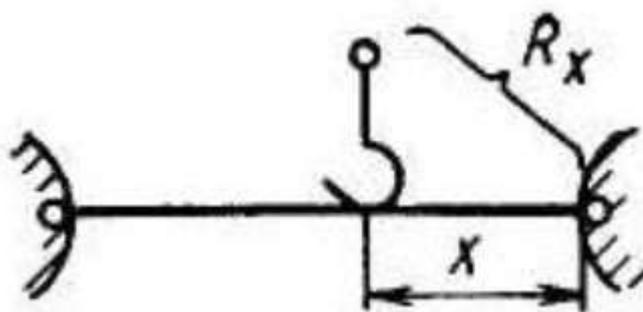


Рисунок 2 – Конструкция реохордного преобразователя

Если для реохордного ПИП чувствительность S определяется как отношение выходного параметра

$$U_{\text{ВЫХ}} = R = \frac{\rho \cdot l}{F}$$

к входному $U_{\text{ВХ}} = l$ то

$$S_1 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\rho}{F}$$

Для реостатного ПИП

$$R = n\rho \frac{\pi \cdot D}{F} = \frac{l}{d} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D}{F},$$

где n - число витков провода реостата;

d - диаметр провода;

D - диаметр витка провода.

Тогда

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D}{d} \cdot S_1$$

Увеличение чувствительности за счет D приводит к увеличению скачков сопротивления преобразователи и увеличению габаритных размеров. Уменьшение d связано со сложностью получения провода малого диаметра.

Реостатные преобразователи широко используются в приборах для измерения уровня жидкости, давления в гидро- и пневмосистемах, ускорения и других механических величин. При этом учитываются такие преимущества:

- простота механической части конструкции;
- возможность получения значительных выходных сигналов, позволяющих без применения усилителей подключать показывающие и регистрирующие устройства;
- возможность передачи информации от ПИП к показывающему устройству на значительные расстояния – до 200...300м.

Недостатки:

- наличие скользящего контакта;
- значительные сопротивления перемещению щетки;
- скачкообразное изменение электрического сопротивления.

Наиболее часто реостатные датчики используют для измерения линейных и угловых перемещений и ускорений, а также статических давлений. В некоторых случаях реостатные датчики могут быть использованы для измерения линейных и угловых скоростей, при условии, что имеется отметчик времени, позволяющий определять время измеряемого линейного или углового перемещения.

Реостатные датчики перемещений обычно используют для измерения перемещений от нескольких миллиметров до десятков метров и углов от нескольких градусов до 360° . В случаях измерения больших перемещений используют многооборотные реостатные преобразователи или однооборотные без ограничения крайних положений. В последнем случае, в процессе измерения регистрируется серия следующих друг за другом перемещений, соответствующих повороту движка преобразователя на 360° . Величина перемещения определяется как число полных оборотов движка плюс неполный последний оборот, выраженные в соответствующем масштабе, который, в свою очередь, определяется передаточным числом механической передачи между перемещающимся объектом и движком.

Измерительные схемы для РПИП

РПИП относятся к группе параметрических ПИП, в которых под действием измеряемой механической величины изменяется активное сопротивление.

Измерительная схема с параметрическими ПИП должна включать источник питания, усилитель (при необходимости), показывающее устройство или регистрирующее устройство и другие элементы.

Наиболее простые измерительные схемы с РПИП показаны на рисунке 2.

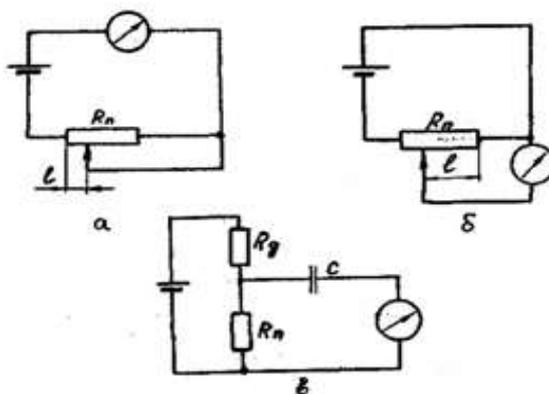


Рисунок 3 – Измерительные схемы

Схемы (рисунок 3 а, б) включают источник питания постоянного тока. РПИП и показывающие приборы – амперметр и вольтметр, шкалы которых проградуированы в единицах измеряемой величины. Такие схемы применимы при значительном изменении сопротивления. Схема (рисунок 3в) потенциометрическая и включает источник постоянного тока, делитель напряжения из R_g и РПИП R_n , конденсатор C и показывающий прибор, измеряющий падение напряжения на R_n .

При наличии C на прибор поступает только переменная составляющая, пропорциональная изменению величины R_n , т.е. схема пригодна для измерения быстроменяющихся параметров. Величина напряжения равна.

$$\Delta U = \frac{I \cdot S \cdot \varepsilon \cdot R_n}{I + \frac{R_n}{R_g}}$$

где

$$I = \frac{U}{R_n + R_g},$$

$$S = \frac{\Delta R_n}{R_n} \cdot \frac{1}{\varepsilon};$$

S - коэффициент чувствительности,

ΔR_n - изменение сопротивления R_n ;

ε - относительное изменение длины рабочей части резистора.

Основной недостаток приведенных схем состоит в том, что показания прибора зависят от напряжения источника питания U .

Для того, чтобы устранить зависимость показаний от напряжения питания в измерительных схемах, применяют логометры (греч. *logos* - слово, отношение). В логометрах положение стрелки указателя зависит от отношения токов, протекающих по двум катушкам подвижной части.

Логометры бывают магнитоэлектрической, ферродинамической, электродинамической, электромагнитной и других систем. Наиболее часто применяются логометры магнитоэлектрической системы.

На оси стрелки закреплены под углом $30^\circ \dots 90^\circ$ две катушки. Неподвижная часть прибора – постоянный магнит с полюсными наконечниками с расточкой специальной формы, за счет чего создается в воздушном зазоре между наконечниками и подвижной частью неравномерное магнитное поле.

Направления токов в катушках противоположны, что создает вращающие моменты M_1 и M_2 от взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и электромагнитных полей катушек также противоположных направлений (рисунок 4).

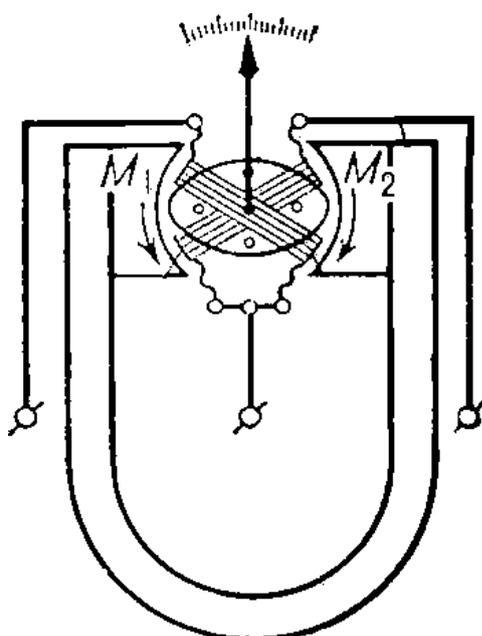


Рисунок 4 – Принципиальная схема логометра

$$M_1 = B_1 I_1 \omega_1 F_1$$

$$M_2 = B_2 I_2 \omega_2 F_2,$$

где

B_1 и B_2 - магнитная индукция в зазоре;

I_1 и I_2 - токи катушек;

ω_1 и ω_2 - число витков катушек;

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 6) состоит из: поплавкового датчика 1 электрического топливомера, смонтированного на основании, показывающего прибора 2, установленного в корпусе, и шкалы 3 с фиксирующим устройством, для отсчета положения поплавка.

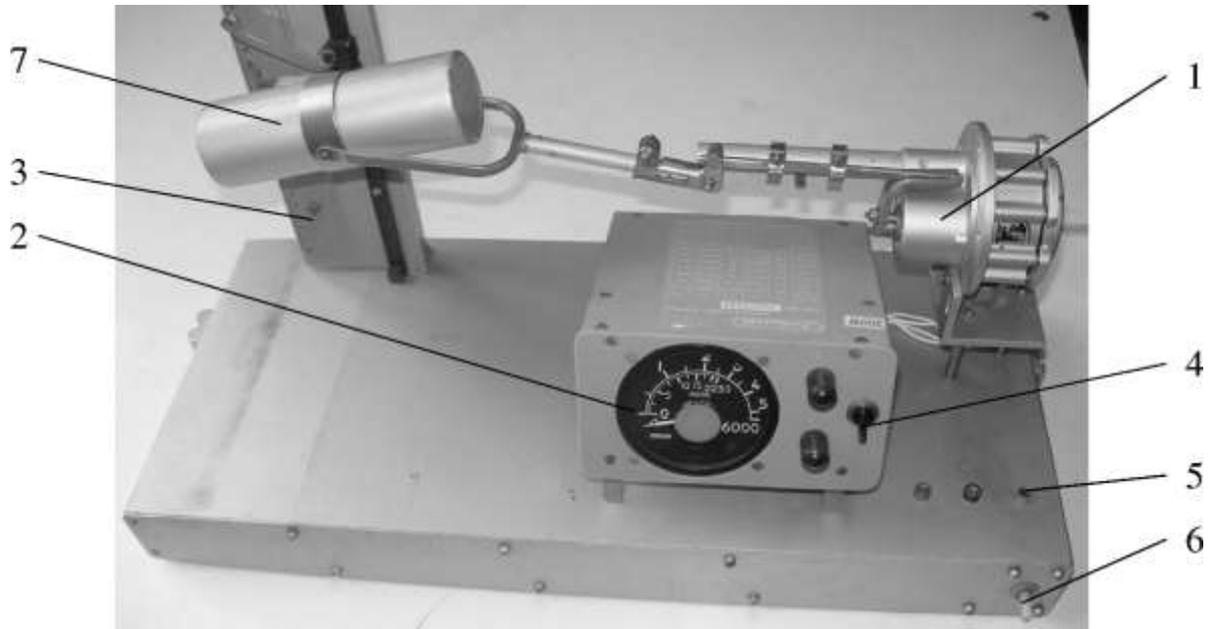


Рисунок 6 – Фотография общего вида лабораторного стенда:

1 – поплавковый датчик электрического топливомера; 2 –показывающий прибор; 3 – отсчетная шкала; 4 – тумблер переключения режимов; 5 – гнезда для снятия показаний в узловых точках; 6 – сетевой тумблер; 7 –поплавок.

Поплавковый датчик 1 электрического топливомера включает в себя поплавок 7 и потенциометр, который установлен в герметичном корпусе. Ползунок потенциометра связан с поплавком 7 рычажной передачей. При перемещении поплавка ползунок скользит по потенциометру и занимает положение, соответствующее уровню топлива в баке.

В качестве показывающего прибора 2 применен магнитоэлектрический логометр с подковообразным магнитом (рисунок 7). Подвижная система логометра выполнена в виде двух рамок, расположенных под некоторым углом.

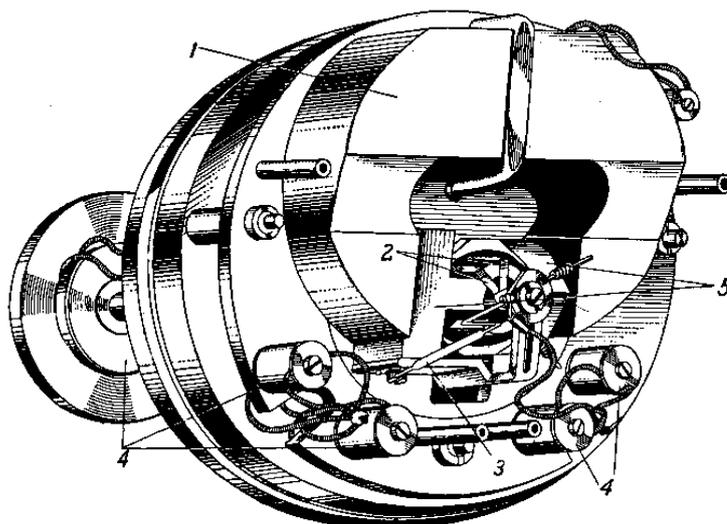


Рисунок 7 – Показывающий прибор топливомера (со снятой шкалой):
1—магнит; 2—подвижные рамки; 3—стрелка; 4—катушки сопротивления;
5—полюсные наконечники.

Для увеличения угла шкалы (с целью повышения точности отсчета показаний) полюсным наконечникам 5 логометра придана специальная форма, которая позволяет получать размах шкалы прибора, равный 180° .

Для уменьшения магнитного влияния указателя на компас и другие приборы, расположенные вблизи, а также для устранения влияния на указатель внешнего магнитного поля на его корпус надевается железный экран. Шкала логометра градуирована непосредственно в литрах.

Гнезда 5 (рисунок 6) подключены к выводам реостатного преобразователя согласно рисунку 8. При положении тумблера 4 (рисунок 6) вниз питание с реостатного преобразователя снято. При положении тумблера вверх – на реостатный преобразователь подано питание.

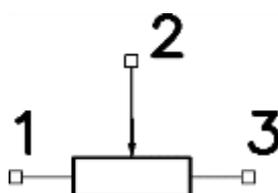


Рисунок 8 – Схема выводов лабораторного стенда

Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Отключить соединительные провода от гнезд стенда (позиция 5, рисунок 6).
3. Включить питание вольтметра В7-27 и измерительного стенда.
4. Переключить вольтметр в режим измерения сопротивления с диапазоном 100 Ом.
5. Переключить тумблер 4 (рисунок 6) в нижнее положение, при этом должен включиться зеленый индикатор.

6. Получить характеристику зависимости сопротивления плеч потенциометра $R_{12} = f(S)$ и $R_{23} = f(S)$ от положения поплавка, где R_{12} и R_{23} – сопротивления между соответствующими гнездами, S – расстояние по шкале 3 на рисунке 6.

Для получения характеристик, фиксируя положение поплавка каждые 5 мм:

- подключить вольтметр к паре гнезд 1 и 2, с помощью соединительных проводов;

- занести значение R_{12} вольтметра в таблицу;

- подключить вольтметр к паре гнезд 2 и 3, с помощью соединительных проводов;

- занести значение R_{23} вольтметра в таблицу;

- переместить поплавок на 5 мм;

7. Построить на одном графике зависимости сопротивления плеч потенциометра $R_{12} = f(S)$ и $R_{23} = f(S)$.

8. Отключить соединительные провода от гнезд стенда.

9. Переключить вольтметр в режим измерения постоянного напряжения с диапазоном 10 В.

10. Переключить тумблер 4 в верхнее положение, при этом должен включиться красный индикатор.

11. Получить характеристики зависимости напряжения на плечах потенциометра от положения поплавка $U_{12} = f(S)$ и $U_{23} = f(S)$, где U_{12} и U_{23} – напряжения на соответствующих гнездах, S – расстояние по шкале 3 (рисунок 6).

Для получения характеристик, фиксируя положение поплавка каждые 5 мм:

- подключить вольтметр к паре гнезд 1 и 2, с помощью соединительных проводов;

- занести значение U_{12} вольтметра в таблицу;

- подключить вольтметр к паре гнезд 2 и 3, с помощью соединительных проводов;

- занести значение U_{23} вольтметра в таблицу;

- переместить поплавок на 5 мм;

13. Построить на одном графике прямую и обратную зависимости $U_{12} = f(S)$ и $U_{23} = f(S)$.

14. Рассчитать значения токов I_{12} и I_{23} , протекающих в плечах потенциометра, а соответственно, и в обмотках логометра. Занести полученные значения в таблицу.

15. Рассчитать отношение токов I_{12}/I_{23} в обмотках логометра. Занести полученные значения в таблицу. Построить график зависимости соотношения токов I_{12}/I_{23} от положения поплавка.

Таблица – Результаты измерений

S, мм	R ₁₂ , Ом	R ₂₃ , Ом	U ₁₂ , В	U ₂₃ , В	I ₁₂ , А	I ₂₃ , А	I ₁₂ /I ₂₃

Лабораторная работа № 9

Исследование способов измерения напряжения

Цель работы

1. Изучить принцип действия электронного и электромеханического вольтметра.
2. Произвести измерение различных напряжений обоими приборами.
3. Проанализировать результаты измерения и указать причины различия в показаниях.

Теоретические сведения

Общие сведения по измерениям напряжения и силы тока

Измерения напряжения и силы тока в электрических цепях относятся к наиболее распространенным видам измерений. При этом преобладающее значение имеет измерение напряжения, так как чаще всего этой величиной принято характеризовать режимы работы различных цепей и устройств. К тому же параллельный метод подключения вольтметра к участку цепи, как правило, не приводит к нарушению электрических процессов в ней, поскольку входное сопротивление прибора выбирается достаточно большим. При измерениях же тока приходится размыкать исследуемую цепь и в ее разрыв последовательно включать амперметр, внутреннее сопротивление которого отлично от нуля. Однако в ряде случаев необходимы как прямые, так и косвенные измерения силы тока, поэтому вопросы измерения напряжения и тока рассматриваются совместно.

Задача измерения постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значения и полярности. Целью измерения переменных напряжения и силы тока является определение какого-либо их параметра. Так как напряжение и сила тока связаны, согласно закону Ома, линейной зависимостью, чаще проводят измерение напряжения и по его значению аналитически вычисляют силу тока.

Современные методы и средства измерений позволяют измерять напряжения в диапазоне $10^{-10} \dots 10^6$ В и силу тока в диапазоне $10^{-18} \dots 10^5$ А. Вместе с тем данные измерения должны осуществляться в очень широкой полосе частот – от постоянного тока до сверхвысоких частот. Такие крайние значения величин требуют уникальных методов измерения.

Измерение параметров переменного напряжения – сложная метрологическая задача, связанная с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого сигнала. Переменное напряжение (переменный ток) промышленной частоты имеет синусоидальную форму

$$U(\tau) = U_m \sin(\omega\tau + \varphi),$$

и его мгновенное значение $U(\tau)$ характеризуется несколькими основными параметрами: амплитудой U_m , круговой частотой $\omega \cdot \tau$ и начальной фазой φ .

Уровень переменного напряжения может быть определен по амплитудному, среднему квадратичному, среднему (постоянной составляющей) или средневывпрямленному значениям.

Мгновенные значения напряжения $U(\tau)$ наблюдают на экране осциллографа или другого индикаторного устройства и определяют в каждый момент времени (рисунок 1).

Амплитуда («высота», «пиковое значение») U_m – наибольшее мгновенное значение напряжения за время наблюдения или за период.

Измеряемые напряжения могут иметь различный вид по форме импульсов, гармонических или негармонических колебаний – суммы синусоиды с постоянной составляющей и т.д. (рисунок 1, а, б, в). При разнополярных несимметричных кривых формы напряжения различают два амплитудных значения (рисунок 1г): положительное U_{+m} и отрицательное U_{-m} .

т.

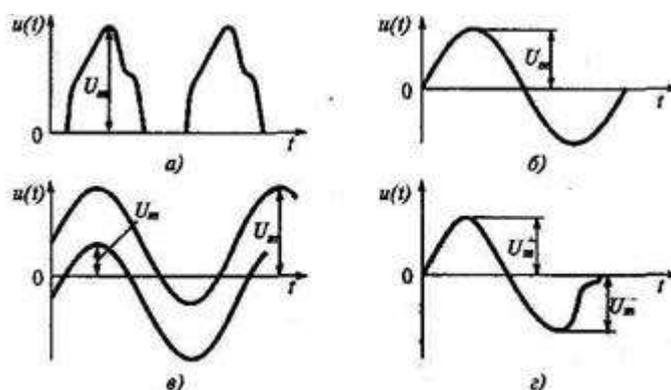


Рисунок 1 – Иллюстрации к понятию амплитуда напряжения:

а – импульсы положительной полярности; б– синусоидальное напряжение; в – сумма синусоиды и постоянной составляющей; г – несинусоидальное колебание

Измерение переменного тока и напряжения

Периодические сигналы (ток и напряжение) характеризуются следующими параметрами.

Среднее квадратичное значение напряжения определяется как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}$$

Если периодический сигнал несинусоидальный, то квадрат среднего квадратичного значения равен сумме квадратов постоянной составляющей и средних квадратичных значений гармоник:

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots$$

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому из мгновенных значений за время изменения (или за период):

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

Средневыпрямленное напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U_{\text{ср.в.}} = \frac{1}{T} \int_0^T |U(t)| dt$$

Для напряжения одной полярности среднее и средневыпрямленное значения равны. В случае разнополярных напряжений эти два значения могут существенно отличаться друг от друга. Так, для гармонического напряжения $U_{\text{ср.}} = 0$, $U_{\text{ср.в.}} = 0,637 U_m$.

При расчетах цепей переменного тока, а также при электрических измерениях неудобно пользоваться мгновенными или амплитудными значениями токов и напряжений, а их средние значения за период равны нулю. Кроме того, об электрическом эффекте периодически изменяющегося тока (о количестве выделенной теплоты, о совершенной работе и т. д.) нельзя судить по амплитуде этого тока.

Наиболее удобным оказалось введение понятий так называемых действующих значений тока и напряжения. В основу этих понятий положено тепловое (или механическое) действие тока, не зависящее от его направления.

Действующее (среднеквадратичное) значение переменного тока - это значение постоянного тока, при котором за период переменного тока в проводнике выделяется столько же теплоты, сколько и при переменном токе.

Наиболее часто измеряют среднее квадратичное значение напряжения, так как этот параметр связан с мощностью, нагревом, потерями. Однако проще измерить амплитудное или средневыпрямленное значение и произвести пересчет с применением коэффициентов амплитуды K_a и формы K_ϕ . Коэффициент амплитуды является отношением амплитудного значения к среднеквадратичному. Коэффициент формы - отношением среднеквадратичного значения к средневыпрямленному. В частности, для синусоидальной (гармонической) формы переменного напряжения: $K_a = 1,41$; $K_\phi = 1,11$.

Коэффициенты амплитуды и формы для сигналов различной формы приведены в таблице 1. В таблице Q - скважность импульса, равная отношению периода к времени импульса

Приборы электромагнитной, электродинамической и тепловой систем реагируют на действующее значение, магнитоэлектрические приборы с выпрямителем - на средневыпрямленное значение, магнитоэлектрические без выпрямителя - на постоянную составляющую, амплитудные электронные вольтметры - на максимальное (пиковое) значение функции.

Таблица 1 – Значения коэффициентов амплитуды и формы

Форма сигнала по рисунку 2	а, б	в	г	д	е	ж, з, и, к
k_a	$\sqrt{2}=1,41$	2	$\sqrt{2}=1,41$	1	\sqrt{Q}	$\sqrt{3}=1,73$
k_ϕ	$\pi/(2 \cdot \sqrt{2}) = 1,11$	$\pi/2 = 1,57$	$\sqrt{2}=1,41$	1	\sqrt{Q}	$2/\sqrt{3} = 1,15$

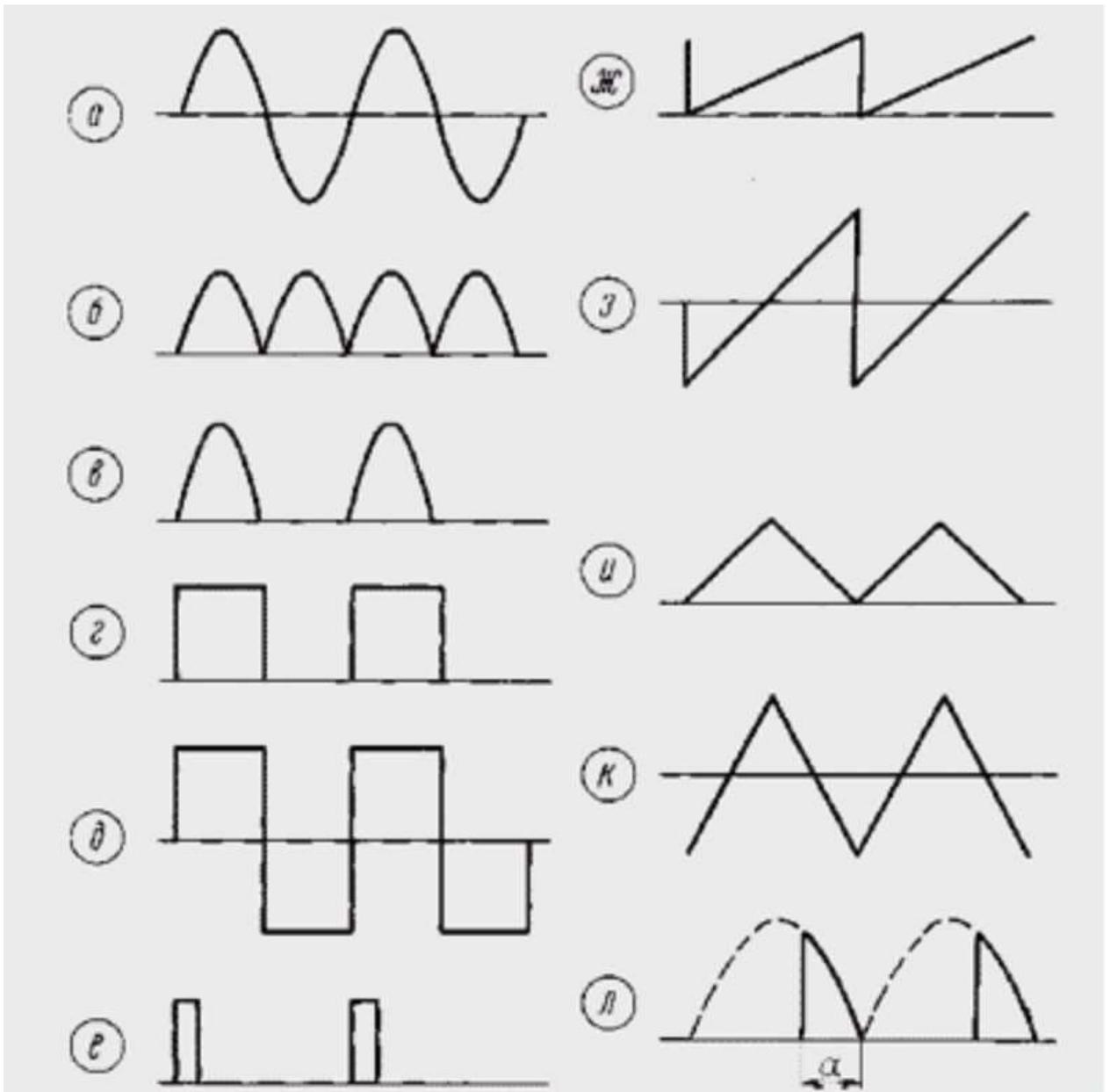


Рисунок 2 – Различные формы сигнала

Основные типы приборов, измеряющих напряжение и силу тока

Напряжение и силу тока измеряют приборами непосредственной оценки или приборами, использующими метод сравнения (компенсаторами). По структурному построению всевозможные приборы, измеряющие напряжение и силу тока, условно можно разделить на три основных типа:

- электромеханические;
- электронные аналоговые;
- цифровые.

Электромеханические приборы

Раньше для измерения напряжения и силы тока широко применялись электромеханические приборы. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений.

По физическому принципу, положенному в основу построения и конструктивному исполнению, эти приборы относятся к группе аналоговых средств измерения, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Электромеханические приборы непосредственной оценки измеряемой величины представляют класс приборов аналогового типа, обладающих рядом положительных свойств: просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокой надежностью и на переменном токе реагируют на среднее квадратичное значение напряжения. Последнее обстоятельство позволяет измерять наиболее информативные параметры сигнала без методических ошибок.

Измерительная схема электромеханического прибора состоит из совокупности сопротивлений, индуктивностей, емкостей и других элементов электрической цепи прибора и осуществляет количественное или качественное преобразование входной величины x в электрическую величину x' , на которую реагирует измерительный механизм. Последний преобразует электрическую величину x' в механическое угловое или линейное перемещение α , значение которого отражается на шкале отсчетного устройства, проградуированной в единицах измеряемой величины $N(x)$. Для этого необходимо чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовало одно и только одно определенное отклонение α . При этом параметры схемы и измерительного механизма не должны меняться при изменении внешних условий: температуры окружающей среды, частоты питающей сети и других факторов.

Измерительные механизмы могут быть построены по следующим системам.

Магнитоэлектрическая система. Вращающий момент возникает за счет взаимодействия тока, протекающего по рамке с обмоткой, с магнитным полем, в котором расположена рамка (рисунок 3).



Рисунок 3 – Приборы магнитоэлектрической системы, принцип действия, варианты применения

Магнитное поле создаётся постоянным магнитом, прошедшим стабилизацию. Между полюсами магнита расположен сердечник таким образом, чтобы воздушный зазор, в котором движется рамка с обмоткой, был равномерным. В обмотку рамки через пружинки или иные упругие элементы, например, растяжки, поступает ток I , и в результате его взаимодействия с постоянным магнитным полем возникает вращающий момент $M_{BP} = B \cdot S w I$, где B - индукция магнитного поля в зазоре, S - площадь обмотки рамки, w - число витков обмотки рамки. Вращающему моменту противодействует момент, создаваемый пружинкой или растяжкой, который в пределах упругих деформаций этих элементов линейно зависит от угла поворота рамки α : $M_{np} = W \cdot \alpha$, где W - жёсткость пружинки (растяжки). В установившемся состоянии, когда $M_{BP} = M_{np}$,

$$\alpha = \frac{B S w}{W} \cdot I$$

с такой точностью, которая обеспечивается стабильностью индукции магнитного поля в зазоре и жёсткости пружинки (растяжки). Современные технологии изготовления и стабилизации магнитов и упругих элементов позволяют достигать значений основной приведённой погрешности магнитоэлектрических приборов вплоть до 0,1%.

Поскольку угол поворота рамки и, стало быть, стрелки линейно зависит от тока в рамке, шкалы автономно применяемых МЭ - приборов равномерные.

Электромагнитная система. Принцип действия электромагнитной системы (рисунок 4) заключается в следующем: вращающий момент создаётся за счёт того, что ток $i(t)$, протекающий по катушке, выполненной, как соленоид со щелевидным отверстием, создаёт электромагнитное поле, которое втягивает внутрь катушки фигурную пластину, изготовленную из электротехнической стали. Этот момент пропорционален квадрату силы тока и содержит поэтому постоянную и переменную составляющие.

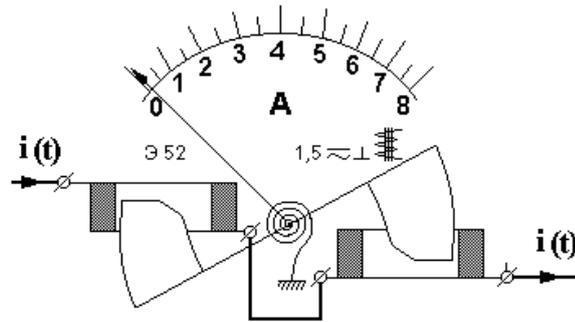


Рисунок 4 – Принцип действия прибора электромагнитной системы.

Частота первой гармоники переменной составляющей равна удвоенной частоте первой гармоники измеряемой силы тока. Прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе. Однако электромагнитные приборы являются всё-таки низкочастотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

Электродинамическая система – измерительный механизм содержит две измерительные катушки: неподвижную и подвижную (рисунок 5). Принцип действия основан на взаимодействии катушек, электромагнитные поля которых взаимодействуют в соответствии с формулой:

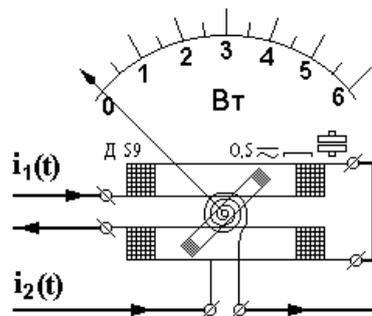


Рисунок 5 – Приборы электродинамической системы, принцип действия, варианты применения

Момент инерции подвижной части прибора (катушка и стрелка) достаточно велик, и поэтому она не успевает реагировать на быстрые изменения токов, то есть является простым механическим низкочастотным фильтром.

Электростатическая система – действие прибора основано на использовании силы, возникающей между пластинами воздушного конденсатора, заряды на которых имеют разные знаки. Схематический чертёж электростатического прибора представлен на рисунке 6. Измеряемое напряжение $u(t)$ прикладывается к неподвижным и подвижным пластинам, которые под действием указанной силы втягиваются в пространство между

неподвижными пластинами. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения и содержит поэтому постоянную и переменную составляющую. Ограничение движения (как и в других электромеханических системах) осуществляется за счёт пружинки. Достоинства этих приборов: широкий частотный диапазон (до 30 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи. Приборы измеряют среднее квадратичное значение напряжения.

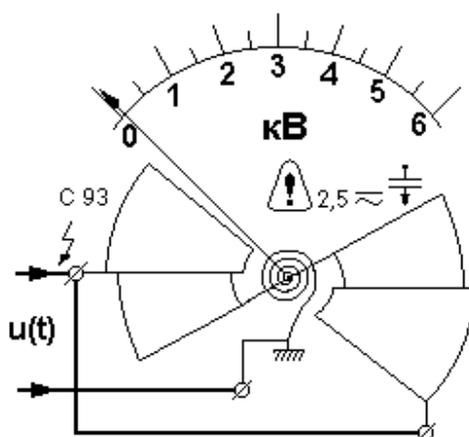


Рисунок 6 – Принцип действия приборов электростатической системы

Аналоговые электронные вольтметры

При измерении напряжения методом непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно участку исследуемой цепи. Для уменьшения методической погрешности измерения собственное потребление вольтметра должно быть мало, а его входное сопротивление велико. Поэтому были разработаны электронные вольтметры. Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и измерительного прибора. В отличие от вольтметров электромеханической группы электронные вольтметры постоянного и переменного токов имеют высокие входное сопротивление и чувствительность, широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), малое потребление тока из измерительной цепи.

Классифицируют электронные вольтметры по ряду признаков:

- по назначению – вольтметры постоянного, переменного и импульсного напряжений; универсальные, фазочувствительные, селективные;
- по способу измерения – приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- по характеру измеряемого значения напряжения – амплитудные (пиковые), среднего квадратичного значения средневыпрямленного значения;
- по частотному диапазону – низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные со стрелочным отсчётом и приборы дискретного типа с цифровым отсчётом.

В соответствии с общепринятыми обозначениями отечественным электронным вольтметрам присваивается индекс В., например, ВК7-16А – вольтметр комбинированный (К) – может измерять сопротивление; 7 – универсальный на постоянный и переменный ток; 16 – номер разработки; А – модификация. Вольтметры постоянного тока имеют индексацию В2, а вольтметры переменного тока – В3.

При измерениях силы тока электронным вольтметром, вначале ток преобразуется в напряжение, а затем определяется по формуле: $I_x = U_x / R_0$.

Структурные схемы аналоговых вольтметров

Структурная схема электронного аналогового вольтметра прямого преобразования соответствует типовой схеме, изображённой на рисунке 7, в самом общем случае включает входное устройство (ВУ), на вход которого подаётся измеряемое напряжение U_x , измерительный преобразователь и магнитоэлектрический прибор, применяемый в качестве измерительного устройства.

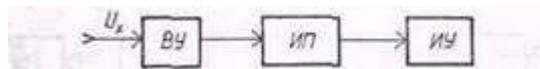


Рисунок 7 – Обобщённая структурная схема аналогового вольтметра прямого преобразования.

Входное устройство представляет в простейшем случае делитель измеряемого напряжения — аттенюатор, с помощью которого расширяются пределы измерения вольтметра. Помимо точного деления U_x , входное устройство не должно снижать входной импеданс вольтметра, влияющий, как уже неоднократно подчёркивалось, на методическую погрешность измерения U_x . Таким образом, использование входного устройства в виде аттенюатора является, в дополнение к добавочным сопротивлениям и измерительным трансформаторам напряжения, ещё одним способом расширения пределов измерения вольтметров. Именно этот способ применяется в электронных вольтметрах и других радиоизмерительных приборах.

Структурная схема аналогового вольтметра постоянного тока соответствует обобщённой схеме (рисунок 7). Основным функциональным узлом таких вольтметров является усилитель постоянного тока. В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока находят ограниченное применение, так как они по своим техническим свойствам сильно уступают цифровым вольтметрам постоянного тока. Поэтому дальше рассматриваются только аналоговые вольтметры переменного тока.

Вольтметры переменного и импульсного тока в зависимости от назначения могут проектироваться по одной из двух структурных схем (рисунок 8), различающихся типом измерительного преобразователя. В

вольтметрах первой модификации (рисунок 8а) измеряемое напряжение U_x преобразуется в постоянное напряжение U_x , которое затем измеряется вольтметром постоянного тока. Наоборот, в вольтметрах второй модификации (рисунок 8б) измеряемое напряжение сначала усиливается с помощью усилителя переменного тока, а затем детектируется и измеряется. При необходимости между детектором и измерительным устройством может быть дополнительно включён усилитель переменного тока.



Рисунок 8 – Структурные схемы аналоговых вольтметров переменного и импульсного тока: а—с детектором на входе; б — с усилителем переменного тока на входе.

Сравнивая структурные схемы рисунке 8, можно ещё до рассмотрения схемных решений их функциональных узлов сделать определённые выводы в отношении свойств вольтметров обеих модификаций. В частности, вольтметры первой модификации в отношении диапазона частот измеряемых напряжений не имеют таких ограничений, как вольтметры второй модификации, где этот параметр зависит от полосы пропускания усилителя переменного тока. Зато вольтметры второй модификации имеют высокую чувствительность. Помощью усилителя переменного тока можно получить значительно больший коэффициент усиления, чем с помощью усилителя постоянного тока, т. е. проектировать микровольтметры, у которых нижний предел U_x ограничивается собственными шумами усилителя. За счет изменения коэффициента деления входного устройства и коэффициента усиления усилителей диапазон измеряемых напряжений может быть большим у вольтметров обеих модификаций.

Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное: амплитудные (пиковые), среднего квадратичного и средневыпрямленного значения. Тип детектора во многом определяет свойства прибора: вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными; вольтметры с детекторами среднего квадратичного значения позволяют измерять, напряжение любой формы; вольтметры средневыпрямленного значения измеряют только гармонические сигналы, но являются самыми простыми и надёжными.

Амплитудный детектор – устройство, напряжение на выходе которого, т.е. на нагрузке, соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого напряжения. Чтобы цепь нагрузки детектора эффективно отфильтровывала постоянную составляющую и подавляла паразитные высокочастотные гармоники, необходимо выполнение неравенства:

$$\frac{1}{\omega C_n} \ll R_n$$

где C_n – ёмкость фильтра; R_n – сопротивление нагрузки детектора.

Ещё одно условие эффективной работы детектора – сопротивление резистора R_n должно быть значительно больше сопротивления диода в его прямой проводимости, что практически всегда выполняется.

Одним из достоинств аналоговых вольтметров с амплитудным детектором является независимость показаний прибора от формы сигнала. Обычно шкала амплитудных вольтметров градуируется в средних квадратичных значениях синусоидального напряжения, т.е. показания прибора: $U_{пр} = U_m / K_a$

Детектор среднего квадратичного значения – преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное корню квадратному из среднего квадрата мгновенного значения напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех последовательных операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировке шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного значения, как правило, производят ячейкой с полупроводниковым элементом путём использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создаётся искусственно.

Детектор средневыпрямленного значения - устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянный ток пропорциональный средневыпрямленному значению напряжения. Структура выходного тока измерительного прибора с детектором средневыпрямленного значения аналогична ранее рассмотренному узлу выпрямительной системы и поэтому их свойства во многом идентичны (зависимость от формы сигнала, частотные характеристики, класс точности). Аналоговый электронный вольтметр средневыпрямленного значения имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи (за счёт дополнительного усиления), чем прибор со схемой выпрямления.

Интегральные амплитудные детекторы. Диодные (как и транзисторные) амплитудные детекторы при малых напряжениях вносят в измеряемый сигнал значительные нелинейные искажения. Поэтому в последние годы в измерительных устройствах применяют амплитудные детекторы на интегральных микросхемах – операционных усилителях – ОУ.

Цифровые вольтметры

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры делятся на: вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратичного значения), импульсные вольтметры – для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсальные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и

переменного тока, а также ряда других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и прочее).

Принцип работы цифровых измерительных приборов основан на дискретном и цифровом представлении непрерывных измеряемых величин. Упрощённая структурная схема цифрового вольтметра приведена на рисунке 9. Схема состоит из входного устройства, АЦП, цифрового отсчётного устройства и управляющего устройства.



Рисунок 9 – Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра.

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представляемый цифровым кодом. Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра. Использование в АЦП цифровых вольтметров двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчётным устройством.

Цифровое отсчётное устройство измерительного прибора регистрирует измеряемую величину. Управляющее устройство объединяет и управляет всеми узлами вольтметра.

АЦП вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и цифровые вольтметры также считаются приборами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь переменного напряжения в постоянное напряжение, чаще всего это детектор средневыпрямленного значения.

Средства расширения пределов измерения

Расширение пределов измерения приборов - это важная технико-экономическая задача, целью которой является уменьшение объёма приборного парка предприятия без ущерба для метрологического обеспечения испытаний изделий и управления технологическими процессами. При наличии средств расширения пределов измерения оказывается возможным применять один и тот же обычно дорогостоящий прибор для измерения величин различного размера. В конкретных ситуациях может потребоваться изменить предел измерения в сторону увеличения верхнего предела измерений, то есть уменьшить чувствительность прибора, а в других случаях

наоборот, - повысить чувствительность, то есть изменить предел измерения в сторону уменьшения верхнего предела измерения. Возможны два варианта решения этой задачи.

В первом варианте средства расширения пределов измерения встраиваются в измерительный прибор, который снабжается ручным переключателем пределов.

Во втором варианте используются внешние средства расширения пределов измерений. Такое внешнее средство расширения пределов измерения есть не что иное, как *масштабирующий линейный измерительный преобразователь*, который изменяет не вид измеряемой величины, а лишь её масштаб.

В качестве внешних средств расширения пределов измерения используются:

- шунты - для расширения пределов измерения силы тока в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности,

- делители напряжения и добавочные сопротивления - для расширения пределов измерения напряжения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности,

- усилители тока и напряжения - для расширения пределов измерения тока или напряжения в сторону уменьшения максимального значения измеряемой величины, то есть для увеличения чувствительности,

- измерительные трансформаторы тока и напряжения - могут применяться для расширения пределов измерения тока или напряжения в обе стороны, но чаще всего применяются для расширения пределов измерения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, то есть для уменьшения чувствительности.

Шунты.

Схема соединения однопредельного амперметра с шунтом показана на рисунке 13.

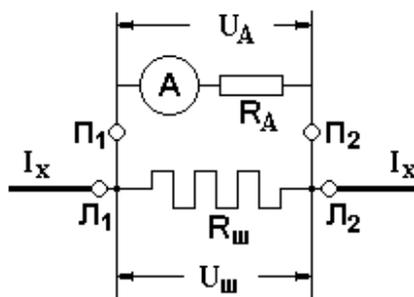


Рисунок 13 – Соединение амперметра с шунтом

Сопротивление шунта между точками присоединения потенциальных зажимов обозначено через $R_{ш}$.

Пусть I_A - ток полного отклонения стрелки, соответствующий верхнему пределу диапазона измерения амперметра А, а U_A - падение напряжения на сопротивлении амперметра при этом токе: $U_A = I_A R_A$.

Пусть I_{max} - верхний предел диапазона измерения силы тока, который желательно обеспечить с помощью шунта.

Очевидно, что при этой силе тока должно выполняться равенство $I_A R_A = (I_{max} - I_A) R_{ш}$, откуда получаем значение масштабного коэффициента расширения предела измерения силы тока:

$$K = \frac{I_{max}}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}.$$

Всегда $K > 1$.

Добавочные сопротивления.

Для расширения пределов измерения напряжения могут использоваться делители напряжения и добавочные сопротивления. Однако, из-за того, что делитель напряжения должен потреблять от объекта ток, превышающий ток собственного потребления вольтметра, на практике для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные сопротивления. Исключение составляет только электростатический вольтметр, который практически не потребляет ток, и с ним могут использоваться делители напряжения, составленные из активных сопротивлений или конденсаторов.

Добавочное сопротивление соединяется последовательно с вольтметром. Если собственное сопротивление вольтметра R_B , а значение добавочного сопротивления R_D , то при подключении к вольтметру добавочного сопротивления верхний предел измерения увеличивается до напряжения

$$U_{max} = I_{Bmax} (R_B + R_D),$$

где I_{Bmax} - ток полного отклонения стрелки вольтметра.

Поэтому коэффициент расширения предела измерения равен:

$$K = \frac{I_{Bmax} (R_B + R_D)}{I_{Bmax} R_B} = 1 + \frac{R_D}{R_B}.$$

Всегда $K > 1$.

Измерительные трансформаторы тока.

Применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного тока. Измерительные трансформаторы тока имеют существенное преимущество перед шунтами, которое заключается в том, что при их применении отсутствует гальваническая связь между первичной обмоткой,

включённой в мощную электрическую цепь объекта, и вторичной обмоткой (рисунок 14).

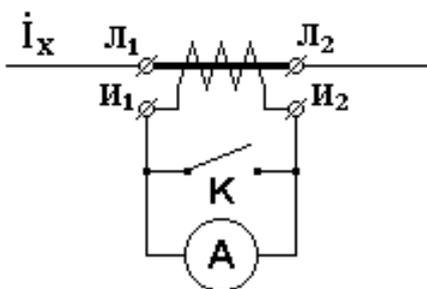


Рисунок 14 – Измерительный трансформатор тока

Разрыв этой гальванической связи способствует обеспечению безопасности персонала, снижению действия помех и облегчает выполнение необходимых соединений во вторичной цепи. Кроме того в ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и мало зависит от внешних влияющих факторов. Схема включения измерительного трансформатора тока в линию с измеряемым током I_x и присоединения амперметра ко вторичной обмотке представлена на рис. 10. На этом рисунке L_1, L_2 - зажимы первичной обмотки трансформатора, к которым подключена линия, H_1, H_2 - зажимы вторичной обмотки, к которым подключается амперметр, К - ключ, замыкающий вторичную обмотку.

Как уже было сказано, коэффициент преобразования трансформатора тока в ограниченном диапазоне частот равен отношению числа витков обмоток трансформатора и может быть как больше, так и меньше единицы.

Особенностью измерительного трансформатора тока является также то, что в отличие от других трансформаторов тока он имеет нормированные метрологические характеристики.

Измерительные трансформаторы напряжения.

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного напряжения. Применение измерительных трансформаторов напряжения даёт те же преимущества перед применением добавочных сопротивлений, что и применение трансформаторов тока. В ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и практически не зависит от действия внешних влияющих факторов. С увеличением частоты сверх этого диапазона начинают расти погрешности передачи амплитуды и фазы измеряемого напряжения. Схемы соединений трансформатора напряжения с участком электрической цепи и с вольтметром во вторичной обмотке особенностей не имеют.

Измерительный трансформатор напряжения отличается от других трансформаторов напряжения тем, что он имеет следующие нормированные метрологические характеристики.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

Произвести последовательно измерение напряжений, снимаемого с генератора сигналов специальной формы Г6-29 с помощью трех вольтметров - электронного В7-26, В7-27, и электромеханического Ц4331. Для контроля сигнала подключить осциллограф С 1-137.

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 синусоидальный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трех вольтметрах.
3. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 синусоидальный сигнал частотой 500 КГц и снять показания на трёх вольтметрах.
4. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 треугольный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трех вольтметрах.
5. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 треугольный сигнал частотой 500 КГц и снять показания на трёх вольтметрах.
6. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 пилообразный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трёх вольтметрах.
7. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 пилообразный сигнал частотой 500 КГц и снять показания на трёх вольтметрах.
8. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 прямоугольный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трёх вольтметрах.
9. Выставить на генераторе сигналов специальной формы Г6-29 прямоугольный сигнал частотой 500 КГц и снять показания на трёх вольтметрах.
10. Рассчитать среднеквадратичное и средневывпрямленное значения напряжения для каждого сигнала.
11. Записать все полученные результаты в таблицу 2.
12. Произвести анализ результатов, дать объяснение различия показаний приборов.

Таблица 2 – Результаты измерений

Тип сигнала	Частота	$U_{Ц4331}, В$	$U_{В7-26}, В$	$U_{В7-27}, В$	$U_{ср.в.}, В$	$U_{ср.кв.}, В$

Лабораторная работа № 10 Интерференционный метод измерения частоты

Цель работы

1. Изучить интерференционный метод измерения частоты.
2. Изучить принцип действия индукционного первичного измерительного преобразователя.
3. Определить число оборотов электродвигателя.

Основные методы измерения частоты сравнением

Методы сравнения применяют главным образом для градуировки и проверки градуировки генераторов сигналов, генераторов калибровочных меток осциллографов, задающих генераторов и т.д.

Для сравнения необходимо иметь второй источник колебаний - обычно образцовый генератор, точность градуировки которого по крайней мере в 5 раз выше точности контролируемого источника, и устройство для сличения частот. Наиболее распространенным и устройствами сличения являются осциллограф и смеситель с индикатором нулевых биений.

Метод интерференционных фигур

Сущность метода заключается в сравнении измеряемой частоты с частотой образцового источника посредством осциллографа. С этой целью колебания известной частоты $f_{обр}$ образцового источника подаются на один вход осциллографа (например, вход X), а колебания измеряемой частоты $f_{изм}$ - на второй вход (например, вход Y).

При этом проекции движущейся точки на оси координат совершают гармонические колебания по закону:

$$\begin{aligned} x &= A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \\ y &= A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \end{aligned}$$

где A_1 , и A_2 - амплитуды колебаний;

ω_1 и ω_2 - частоты колебаний;

φ_1 и φ_2 - фазовые углы,

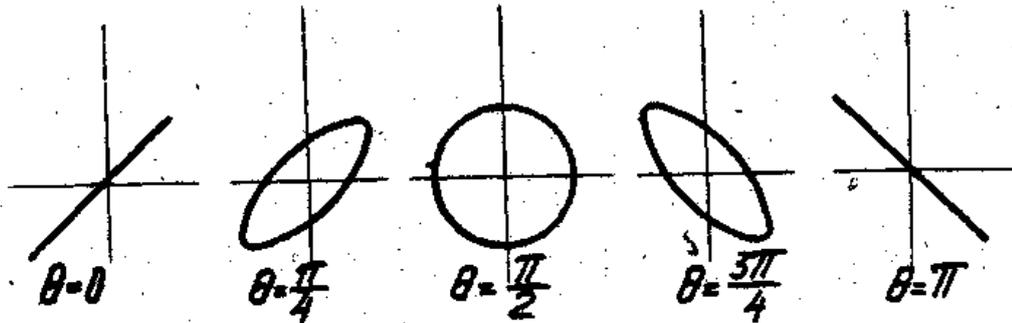
Сама точка в этом случае будет на плоскости совершать движения по кривым, которые называются фигурами Лиссажу или фигурами кратности.

Частоту образцового генератора перестраивают до получения на экране осциллографа устойчивого изображения простейшей интерференционной фигуры: прямой, окружности или эллипса. Появление одной из этих фигур свидетельствует о равенстве частот напряжений, поданных на оба входа осциллографа (отношение $f_{изм} : f_{обр} = 1:1$).

Вид кривой зависит от соотношения частот ω_1 и ω_2 амплитуды A_1 , и A_2 и разности фаз $\theta = \varphi_1 - \varphi_2$. Если частоты совпадают $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, то уравнение движения точки (при исключении времени t) будет:

$$\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 - A_2} \cdot \cos \theta + \frac{y^2}{A_2^2} = \sin \theta$$

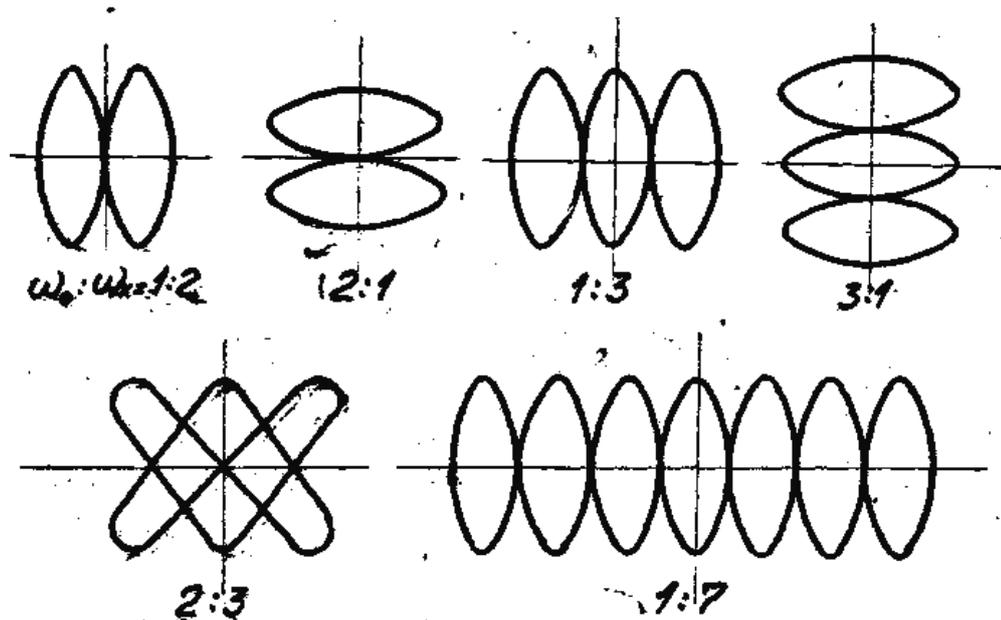
т.е. точка в этом случае движется по эллипсу с центром в начале координат. При разных значениях θ , $A_1 = A_2$, $\omega_1 = \omega_2$ возможны фигуры, показанные на рисунке 1.



Фигуры Лиссажу при $A_1 = A_2$; $\omega_1 = \omega_2$

Рисунок 1 – Фигуры Лиссажу с кратностью 1:1

Если частоты ω_1 и ω_2 ($f_{изм}$ и $f_{обр}$) не равны, но кратны целым числам, то получаются более сложные кривые (рисунок 2).



Фигуры Лиссажу при $A_1 = A_2$, $\theta = 0$

Рисунок 2 – Фигуры Лиссажу больших кратностей

Соотношение частот определяется следующим образом (рисунок 3). Через изображение фигуры мысленно проводят две прямые линии: горизонтальную и вертикальную.

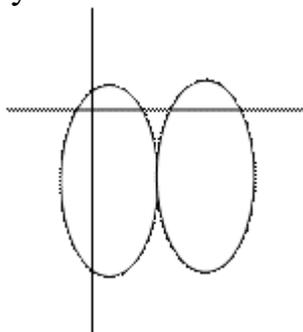


Рисунок 3 – Интерференционная фигура второго порядка

Отношение числа m пересечений горизонтальной прямой с фигурой к числу n пересечений вертикальной прямой с фигурой равно отношению частоты напряжения, поданного на вход канала Y к частоте напряжения, поданного на вход канала X осциллографа:

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{m}{n}$$

При больших величинах m или n пользование методом интерференционных фигур затруднительно.

Если точное равенство частот не достигнуто, т.е. $f_{\text{изм}} : f_{\text{обр}} \pm F_p$, то фигура непрерывно изменяется, принимая форму эллипсов с переменной длиной осей или прямой. На низких частотах можно определить величину погрешности F_p ,

сосчитав число периодов p изменения фигуры за определенный промежуток времени Δt . Тогда

$$F_p = \frac{p}{\Delta t}$$

В случае, когда частоты не равны друг другу, но кратны, на экране осциллографа наблюдаются более сложные фигуры. При строгой кратности эти фигуры неподвижны. Ещё сложнее фигуры получаются для дробного отношения частот.

Подобным способом измеряют также частоту следования импульсов. В этом случае импульсы подают на вход У осциллографа, а синусоидальное напряжение от источника известной частоты на вход Х. Плавно изменяя частоту синусоидального напряжения, добиваются устойчивого или медленно перемещающегося изображения одиночного импульса на экране осциллографа. Это свидетельствует о том, что частота следования импульсов F_c равна частоте синусоидального напряжения F_{\sin} или в целое число раз меньше её.

Зная кратность фигуры Лиссажу, можно при известной частоте $\omega_1 = \omega_0$ определить частоту $\omega_2 = \omega_x$, т.е. определить, например, скорость вращения вала, ротора электродвигателя и других подвижных элементов механических систем. Измеряя размеры эллипса при одинаковых ω_1 и ω_2 , можно расчетным путем определить угол фазового сдвига между двумя напряжениями, что необходимо при исследовании работы фильтров, усилителей, трансформаторов и других элементов электрических цепей.

б) Метод круговой развертки с модуляцией яркости.

Этот метод применяют в случаях, когда сравниваемые частоты кратны, но отношение их велико. Он заключается в следующем.

Если измеряемая частота $f_{\text{изм}}$ выше частоты образцового генератора $f_{\text{обр}}$, то напряжение частоты $F_{\text{обр}}$ подают одновременно на оба входа осциллографа со сдвигом по фазе на 90° , достигаемым с помощью фазорасщепителя. Усиление обоих каналов регулируют так, чтобы луч вычерчивал на экране окружность. Напряжение измеряемой частоты подают в канал электрода управления яркостью. Частоту образцового источника перестраивают до получения на экране неподвижного изображения, состоящего из ярких отрезков окружности с одинаковыми темными промежутками между ними (рисунки 4).

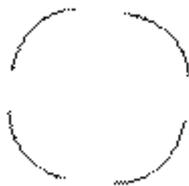


Рисунок 4 – Изображение на осциллографе при модуляции яркости

Число ярких дуг или темных промежутков между дугами однозначно определяет отношение $N = f_{\text{изм}} : f_{\text{обр}}$. При дробно-рациональных отношениях частот вращающийся луч вычерчивает либо сплошь засвеченную окружность, либо пунктирную окружность, для которой характерны меньшая яркость дуг и меньше промежутки между ними, чем при кратных частотах. Количество светящихся отрезков равно большему из чисел дроби.

Если частоты $f_{\text{изм}}$ и $f_{\text{обр}}$ немного отличаются от кратного отношения, т.е. $f_{\text{изм}} = f_{\text{обр}} \pm F_p$ (частота F_p сравнительно мала), то фигура, состоящая из дуг, вращается, причем направление вращения показывает знак расхождения частот. Величину расхождения (и обусловленную им погрешность измерения частоты) можно определить следующим образом: сосчитать с помощью секундомера число d дуг, пробегающих через определенную радиальную линию на экране за фиксированный промежуток времени Δt . Тогда расхождение F_p может быть найдено из формулы

$$F_p = \frac{d}{\Delta t}$$

Аналогичным способом можно измерить и частоту следования импульсов. В этом случае напряжением генераторов известной частоты осуществляется круговая развертка, а импульсное напряжение измеряемой частоты подается в канал управляющего электрода трубки. Получающаяся на экране картина зависит от полярности измеряемых импульсов. Если они положительны, т.е. повышают яркость свечения, то с помощью регулятора яркости гасят изображение круговой развертки и на экране наблюдаются светящиеся точки. Изменением частоты синусоидального напряжения добиваются неподвижного положения точек. Тогда число светящихся точек M определяет отношение $M = F_c / F_{\text{sin}}$.

Описание измерительной установки

Принципиальная схема измерительной установки показана на рисунке 5. Для сложения проекций движущейся точки используется осциллограф 4, на вертикально отклоняющие пластины которого подается напряжение с частотой ω_x , пропорциональной скорости вращения P_x вала ротора электродвигателя, а на горизонтально отклоняющие – напряжение с частотой ω_0 , которая может быть изменена и определена с достаточно высокой точностью.

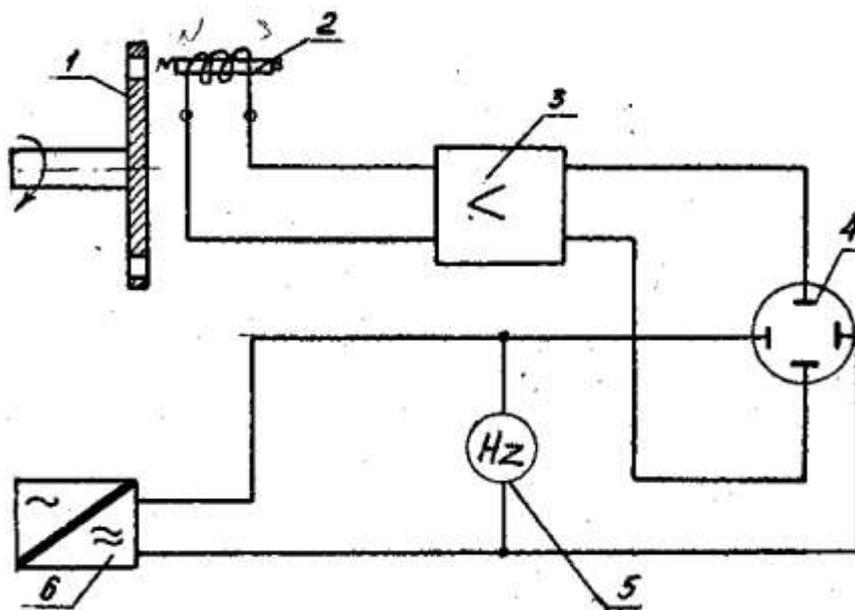


Рисунок 5. Схема измерительной установки.

1 - диск на валу электродвигателя, 2 - индукционный ПИП, 3 - усилитель (для усиления может быть использован усилитель осциллографа), 4 - осциллограф, 5 - частотомер, 6 - генератор синусоидальных колебаний.

На валу электродвигателя установлен диск 1 с числом отверстий m ; около диска расположен индукционный первичный измерительный преобразователь ИПИП, 2, состоящий из постоянного магнита с катушкой. Во время вращения вала электродвигателя магнитное поле пересекается спицами диска, что изменяет магнитный поток проходящий через катушку ИПИП. Благодаря этому магнитный поток, сцепляющийся с витками катушки, становится переменным, что приводит к наведению переменной ЭДС, частота которой равна частоте пересечения магнитного поля спицами диска. Тогда

$$P_x = \frac{\omega_x}{m} \cdot 60, \quad \text{об/мин}$$

От генератора 6 напряжение подается на горизонтально отклоняющие пластины. Изменяя частоту ω_0 генератора, получаем фигуру Лиссажу с определённой кратностью.

Точность измерения частоты интерференционным методом зависит от точности задания частоты ω_0 генератором 6 и правильности определения момента равенства или кратности частот. Если в генераторе частоты применяется стабилизация с помощью кварцевого генератора, то погрешность может составлять тысячные доли процента. В данной работе изменение частоты генератора задается изменением емкости колебательного контура. Погрешность в этом случае составляет около 1%. Повысить точность возможно, если значение ω_0 устанавливается с помощью частотомера 5,

погрешность которого меньше. Если применяется частотомер Ф 5043, то погрешность определения составит $\pm 0,5\%$, а если частотомер ЧЗ-24, то $\pm 0,001\%$.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Включить генератор ГЗ-18, частотомер Ф 5043, осциллограф С1-19Б и электродвигатель с диском ИПИП в сеть. После прогревания приборов убедиться, что при регулировании частоты генератора изменяются показания частотомера. Вращая диск ИПИП, вручную добиться отклонения луча осциллографа в вертикальном направлении.
3. Включить электродвигатель диска и, изменяя частоту генератора ω_0 , добиться равенства частот ω_0 и ω_x , т.е. получить фигуру Лиссажу с кратностью $K_2 = 1$. Снять показание по шкале генератора или частотомера. Рассчитать значение ω_x .
4. Получить фигуры с $K_2=2:1$, $K_3=1:2$ и любым другим K_4 . Определить значение ω_{x2} , ω_{x3} и ω_{x4} .
5. Измерить ω_x с помощью частотомера и сравнить с четырьмя значениями, определенными интерференционным методом. Сделать заключение о зависимости точности измерения от кратности частот.
6. Сравнить все четыре значения ω_x и сделать заключение.

Лабораторная работа №11
Преобразование измеряемой величины в электрические сигналы,
модулированные по амплитуде

Цель работы

1. Изучить способы включения индуктивных преобразователей в мостовую схему.
2. Исследовать возможность применения индуктивного моста в качестве амплитудного модулятора.
3. Исследовать и измерить сигналы в различных узлах мостовой схемы.
4. Ознакомиться со структурной схемой, конструкцией и принципом действия работы расходомера РТСВ.

Общие сведения о модуляции

Определение модуляции

Модуляция – это процесс изменения тех или иных параметров высокочастотного сигнала несущей частоты в соответствии с формой передаваемого низкочастотного сигнала. Сущность модуляции заключается в следующем. Формируется некоторое колебание (чаще всего гармоническое), называемое несущим колебанием или просто несущей, и какой-либо из параметров этого колебания изменяется во времени пропорционально исходному сигналу. Исходный сигнал называют модулирующим, а результирующее колебание с изменяющимися во времени параметрами – модулированным сигналом. Обратный процесс – выделение модулирующего сигнала из модулированного колебания – называется демодуляцией.

В зависимости от того, какой параметр несущей подвергается изменению, выделяют следующие виды модуляций:

- амплитудная модуляция (АМ), происходит изменение амплитуды несущего колебания;
- частотная модуляция (ЧМ), происходит изменение частоты несущего колебания;
- фазовая модуляция (ФМ), происходит изменение фазы несущего колебания.

1.2 Амплитудная модуляция

Формирование сигнала методом амплитудной модуляции показано на рисунке 1 (а – несущий сигнал; б – модулирующий сигнал; в – результат)

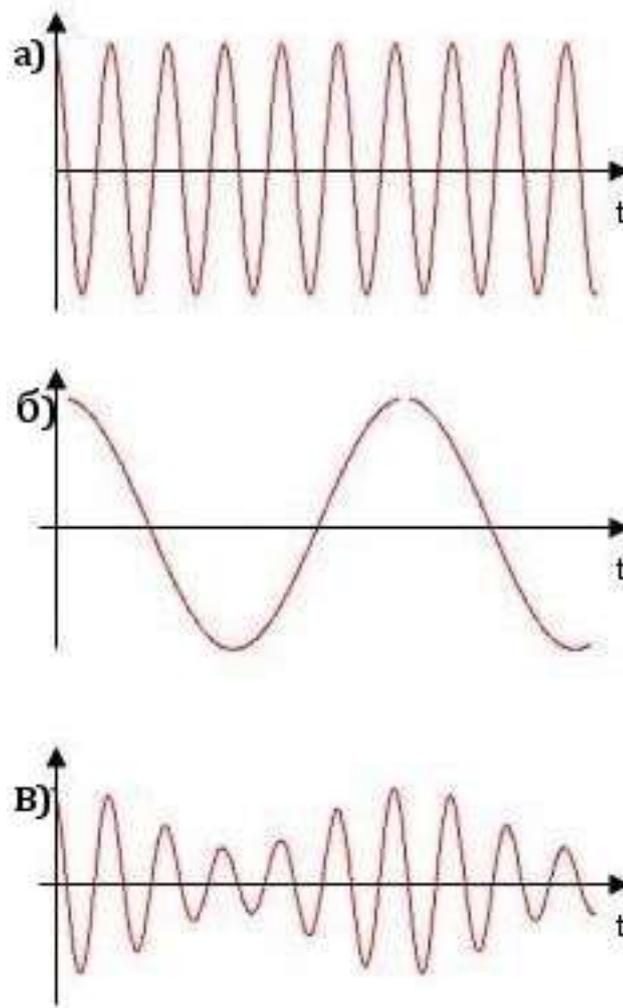


Рисунок 1 – Происхождение сигнала амплитудной модуляции

Пусть величина тока в колебательном контуре изменяется по гармоническому закону:

$$I = I_0 \cdot \cos \omega_0 t \quad (1)$$

При наложении низкочастотного сигнала (частотой Ω) изменения тока в контуре превращаются в более сложные колебания, амплитуда которых начинает сравнительно медленно меняться с частотой Ω :

$$I = I_0(1 + f(t)) \cdot \cos \omega_0 t \quad (2)$$

где $f(t) = K \cos \Omega t$ – модулирующая функция, причем $|f(t)| < 1$.
 Тогда имеем:

$$I = I_0(1 + K \cos \Omega t) \cos \omega_0 t, \quad (3)$$

т.к. частота модуляции $\Omega \ll \omega_0$ (ω_0 – несущая частота), то колебание (6.3) можно рассматривать как гармоническое, имеющее амплитуду $I_0(1 + K \cos \Omega t)$. Максимальное и минимальное значение амплитуды: $I_{\max} = I_0(1 + K)$, $I_{\min} = I_0(1 - K)$.

Величина

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

называется глубиной модуляции (рисунок 2).

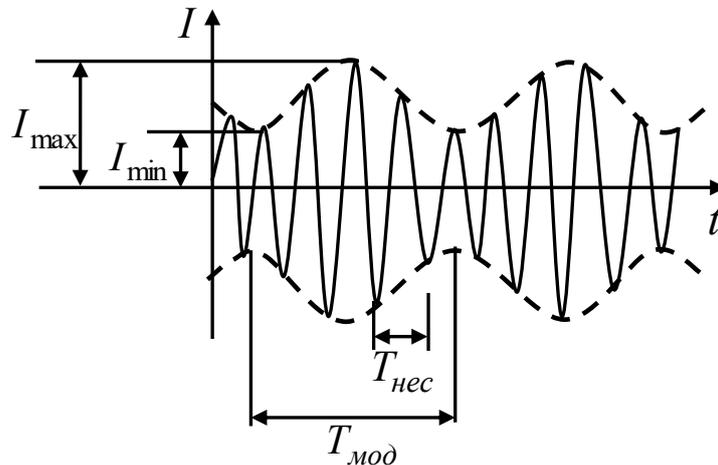


Рисунок 2 – Параметры модулированного сигнала

Дифференциальный способ включения датчика в измерительную цепь
 Дифференциальная измерительная цепь представляет собой электрическую цепь, состоящую из двух смежных контуров, имеющих одну общую ветвь. В каждом из таких контуров цепи действует отдельная э. д. с. (рисунок 3).

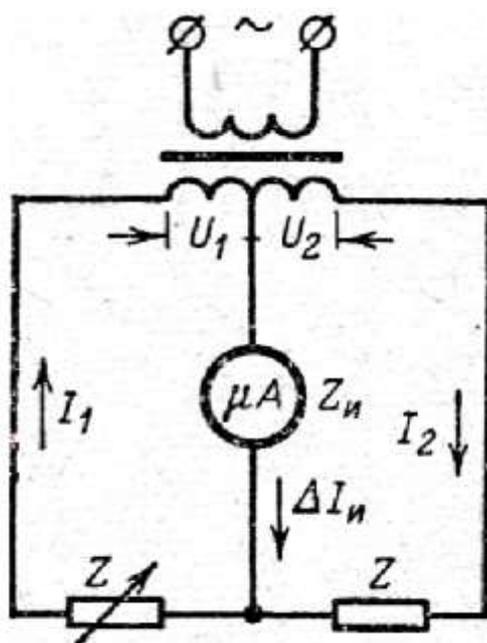


Рисунок 3 – Схема дифференциальной измерительной цепи

В общую для обоих контуров ветвь включается индикаторный прибор, реагирующий на разность действующих в контурах э. д. с. (при параллельном включении контуров) или ток (при последовательном включении контуров).

Вместо одного или двух сопротивлений, входящих в оба контура дифференциальной схемы, могут включаться датчики, реагирующие на измеряемую величину. Изменение соотношения величин сопротивлений вызывает соответствующую разбалансировку измерительной цепи, что регистрируется индикаторным прибором.

Если предположить, что $U_1 = U_2 = U$ и $Z_{и} \ll Z$, а датчик включен в один из контуров и изменяет свое сопротивление на ΔZ , то чувствительность дифференциальной измерительной цепи по току, определяемая как отношение приращения тока индикатора $\Delta I_{и}$ к изменению сопротивления датчика ΔZ , может быть найдена из выражения

$$K_{дцI} = \frac{U}{(Z + 2Z_{и})Z}$$

а по напряжению (при условии $Z_{и} \gg Z$)

$$K_{дцU} = \frac{U}{\left(2 + \frac{Z}{Z_{и}}\right)Z}$$

Дифференциальные схемы имеют более высокую чувствительность по сравнению с мостовыми схемами. Они используются преимущественно на переменном токе. В этом случае применяются датчики сопротивлений, емкостные и индуктивные. При использовании только датчиков сопротивления и соответствующих источников питания дифференциальные цепи могут применяться и на постоянном токе.

Применение дифференциальных измерительных цепей в измерителях неэлектрических величин, так же, как и в случае применения мостовых цепей,

позволяет осуществить компенсацию влияния нестабильности внешних условий (обычно температуры) на точность измерения.

Такая компенсация производится путем установки вместо сопротивлений в плечах дифференциальной цепи двух идентичных датчиков или же одного дифференциального. С помощью одного из датчиков производится измерение неэлектрической величины, второй же датчик остается свободным, но оба они подвергаются воздействию общего дестабилизирующего фактора (например, температуры). Степень компенсации зависит от идентичности датчиков и плеч измерительной схемы.

Достоинством дифференциальных измерительных цепей, использующих нулевой (балансный) метод измерений, является независимость результата измерения от величины питающего схему тока или напряжения.

Питание дифференциальной измерительной цепи для индуктивного датчика осуществляется переменным током, поэтому при появлении сигнала на датчике и разбалансировке цепи ток в общей цепи протекает также переменный. Величина его амплитуды зависит от разности сигнала датчиков. Таким образом дифференциальная измерительная цепь осуществляет амплитудную модуляцию частоты питания по сигналу с датчиков.

Описание лабораторного стенда.

Перечень приборов, входящих в лабораторный стенд

В состав лабораторного стенда (рис. 3) входят:

- прибор показывающий РТСВ 10-8;
- блок питания и усиления БПУ 2-1;
- измерительный блок;
- датчик расхода РТС 10;
- датчик плотномер ДПЕ 3-1;
- усилитель импульсный с питанием УИП4-1;
- генератор ПАГ 1-Ф;
- электродвигатель ДИД.

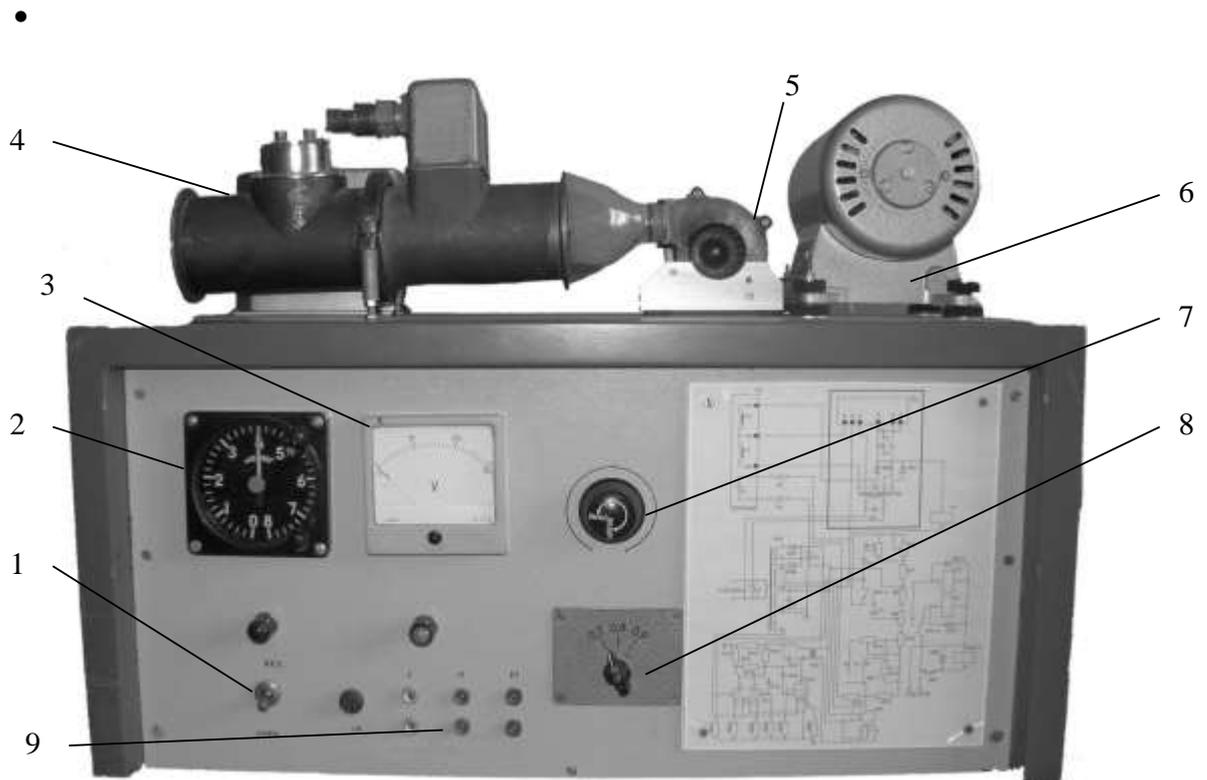


Рисунок 4 – Фотография общего вида лабораторного стенда:

- 1 – тумблер включения питания;
- 2 – показывающий прибор РТСВ 10-8;
- 3 – вольтметр;
- 4 – измерительный узел расходомера;
- 5 – крыльчатка;
- 6 – генератор ПАГ 1-Ф;
- 7 – регулятор частоты вращения крыльчатки;
- 8 – переключатель плотности;
- 9 – разъемы для снятия осциллограмм.

Принцип работы лабораторного стенда

Принцип работы лабораторного стенда (рисунок 5) заключается в том, что измеряемое вещество, протекая через датчик расхода с некоторой скоростью, приводит во вращение крыльчатку, скорость вращения которой в широких пределах пропорциональна часовому расходу измеряемого вещества, а число оборотов – количеству протекшего через датчик измеряемого вещества в объемных единицах. Вращение крыльчатки преобразуется индуктивно-импульсным устройством в импульсы переменного тока.

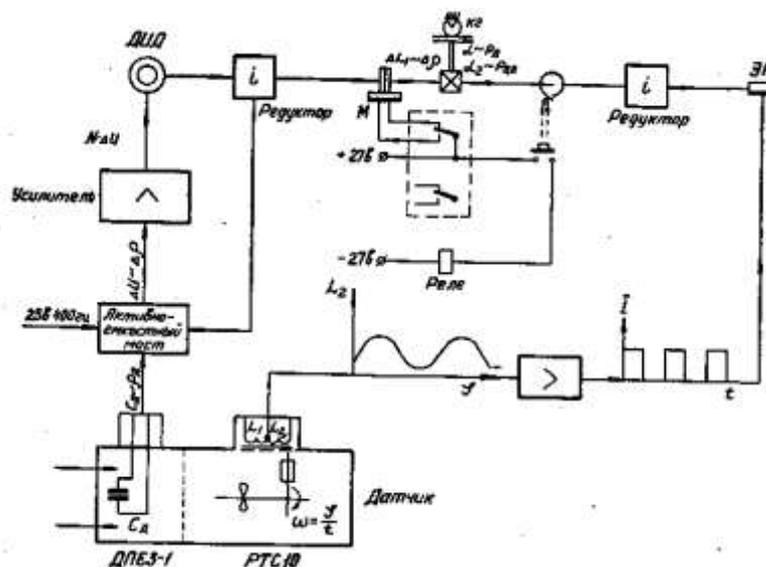


Рисунок 5 – Принципиальная схема лабораторного стенда

При измерении расхода вещества электрические сигналы от индуктивно-импульсного устройства датчика расхода усиливаются и с помощью якоря электромагнита ЭМ в показывающем приборе преобразуются в перемещение стрелки по шкале L_2 , которое пропорционально массе вещества $P_{0,8}$, протекшего через датчик при плотности вещества $0,8 \text{ г/см}^3$.

Формула, которую решает лабораторный стенд:

$$P_n = P_3 - \left[\frac{N}{K} + \sum_{n=0}^m \Delta V_{const} \cdot (\rho_d - \rho_p) \right],$$

где P_n – оставшийся запас вещества по шкале показывающего прибора, кг;

P_3 – заданное (исходное) количество вещества, кг;

N – количество импульсов, посылаемых датчиком расхода в показывающий прибор.

K – расчетное количество импульсов, соответствующее одному килограмму вещества при плотности вещества $0,8 \text{ г/см}^3$;

ΔV_{const} – объем вещества, на который вносится поправка;

ρ_d – действительная плотность вещества в момент внесения n -ой поправки, г/см^3 ;

ρ_p – расчетная плотность, равная $0,8 \text{ г/см}^3$;

m – число поправок на количество вещества, прошедшего через датчик.

Специальное устройство, состоящее из датчика плотномера ДПЕ, включенного в измерительный мост, усилителя и исполнительного двигателя, корректирует показания показывающего прибора в зависимости от изменения плотности вещества.

Датчик плотномера представляет собой плоский воздушный конденсатор C_d , электрическая емкость которого пропорциональна плотности вещества ρ_d , омывающего его пластины и заполняющего пространство между ними.

Датчик плотномера подключен к самобалансирующемуся измерительному мосту и в зависимости от плотности вещества движок реостата, связанный с осью ротора двигателя, занимает вполне определенное положение.

Поправка по плотности вносится периодически через определенные порции израсходованного вещества (250 л) в виде дополнительного углового перемещения стрелки показывающего прибора $\Delta\alpha$, пропорционального отклонению действительной плотности от расчетной – $\Delta\rho$.

При внесении поправки датчик плотномера отключается контактами реле от измерительного моста и вместо него подключается замещающая емкость, соответствующая плотности вещества 0,8 г/см³. Параметры моста подобраны таким образом, что при подключении замещающей емкости движок реостата занимает среднее положение.

Одновременно подается напряжение 27 В на рабочую обмотку электромагнитной муфты М, соединяющей через дифференциал ротор двигателя со стрелкой показывающего прибора.

Стрелка показывающего прибора перемещается на дополнительный угол $\pm\alpha L$, пропорциональный разности плотностей расчетной и действительной.

Измерительный узел расходомера

Измерительный узел расходомера включает в себя два датчика (рисунок б):



Рисунок б – Измерительный модуль расходомера

1 – датчик расхода вещества для измерения суммарного расхода вещества в объемных единицах (литрах), чувствительным элементом которого является вращающаяся винтовая крыльчатка;

2 – датчик плотномера для измерения плотности вещества, чувствительным элементом которого является плоский конденсатор.

Датчик расхода вещества (рисунок 7) имеет полый корпус 1 с фланцами на концах.

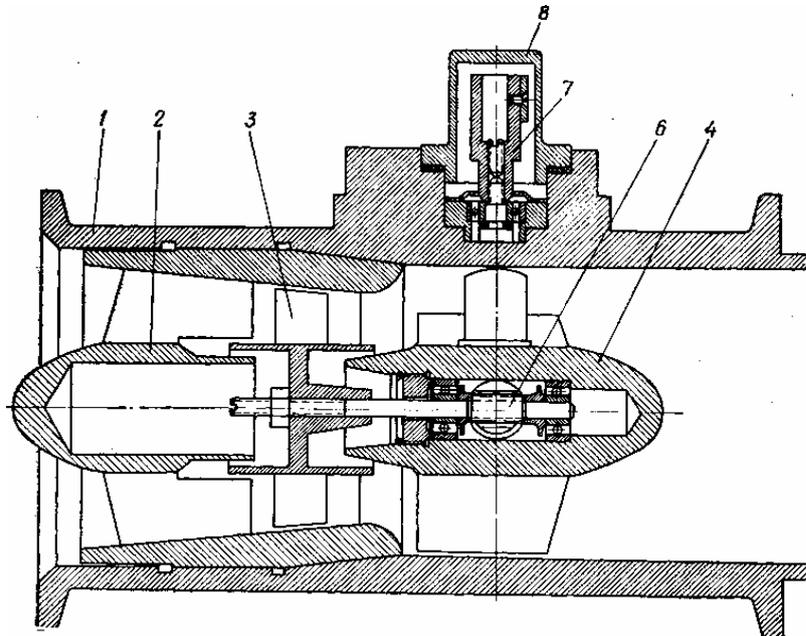


Рисунок 7 – Внутреннее устройство датчика расхода
1 – корпус; 2, 4 – струевыпрямители; 3 – крыльчатка; 6 – ось с червяком на котором закреплена втулка с сердечником; 7 – индукционная катушка; 8 – колпачок.

Вещество из магистрали, поступая в датчик расхода, проходит струевыпрямитель 2 и попадает на винтовые лопасти крыльчатки 3, приводя ее во вращательное движение.

Затем вещество проходит через второй струевыпрямитель 4 и далее через датчик плотномера поступает в магистраль.

Струевыпрямители выравнивают поток вещества до и после крыльчатки, что способствует получению линейной зависимости (пропорциональности) между скоростью потока и числом оборотов крыльчатки.

Ось крыльчатки вращается в шариковых подшипниках из нержавеющей стали, заключенных в полости струевыпрямителя 4.

Вещество, попадая на лопасти крыльчатки, вращает ее. Лопасти крыльчатки расположены под углом к направлению движения потока вещества.

Максимальному расходу вещества датчика соответствует определенное число оборотов крыльчатки.

Для регулировки скорости вращения крыльчатки на заданное число оборотов крыльчатке и каналу, в котором она вращается, придается

коническая форма. Изменение числа оборотов производится перемещением крыльчатки в осевом направлении.

Так как поток вещества при постоянном расходе в разных сечениях канала имеет различную скорость, то и крыльчатка при перемещениях вдоль канала изменяет свою скорость вращения.

Перемещение крыльчатки к выходному струевыпрямителю приводит ее в зону увеличенной скорости потока и, следовательно, к увеличению числа оборотов крыльчатки. И наоборот, перемещение крыльчатки к входному струевыпрямителю приводит ее в зону пониженной скорости потока и, следовательно, к уменьшению числа оборотов.

Через червячную передачу 6, расположенную внутри выходного струевыпрямителя, крыльчатка вращается с замедлением в 30 раз втулку со стальным сердечником, расположенную внутри защитного колпачка 8. С внешней его стороны расположены одна над другой две индуктивные катушки 7 со стальными П-образными пластинами сердечника, обмотки которых представляют два плеча индуктивного моста.

За один оборот сердечника происходит одно изменение индуктивности нижней катушки, и следовательно, мост (рисунок 3), составленный из катушек индуктивности датчика и обмоток трансформатора усилителя УИП4-1 выходит из равновесия.

По своему принципу действия скоростной датчик расхода вещества является объемным прибором, т. е. с помощью скоростного датчика запас может быть измерен непосредственно в объемных единицах. Крыльчатка датчика рассчитана таким образом, что при прохождении через датчик 1,538 л вещества его индуктивно-импульсное устройство посылает один импульс тока в электромагнит показывающего прибора, или один литр вещества, прошедшего через датчик, соответствует 0,65 импульса.

Число импульсов тока на килограмм вещества зависит от плотности вещества и определяется из формулы:

$$K_1 = \frac{K_2}{\rho}, \text{ где:}$$

K_1 – количество импульсов на 1 кг вещества;

K_2 – количество импульсов на 1 л вещества;

ρ – плотность вещества, г/см³.

Для начального уравнивания индуктивного моста в датчике предусмотрен магнитный шунт, укрепленный около верхней катушки индуктивности стопорным винтом. Положение магнитного шунта устанавливается при регулировке моста на заводе.

Датчик плотномера (рисунок 8) состоит из корпуса 2 с розетками 3 и двух пакетов пластин 1. Пакеты пластин установлены в корпусе и закреплены с двух сторон кольцами. Каждый пакет пластин соединен с розетками проводниками через токоведущие стержни проходных изоляторов.

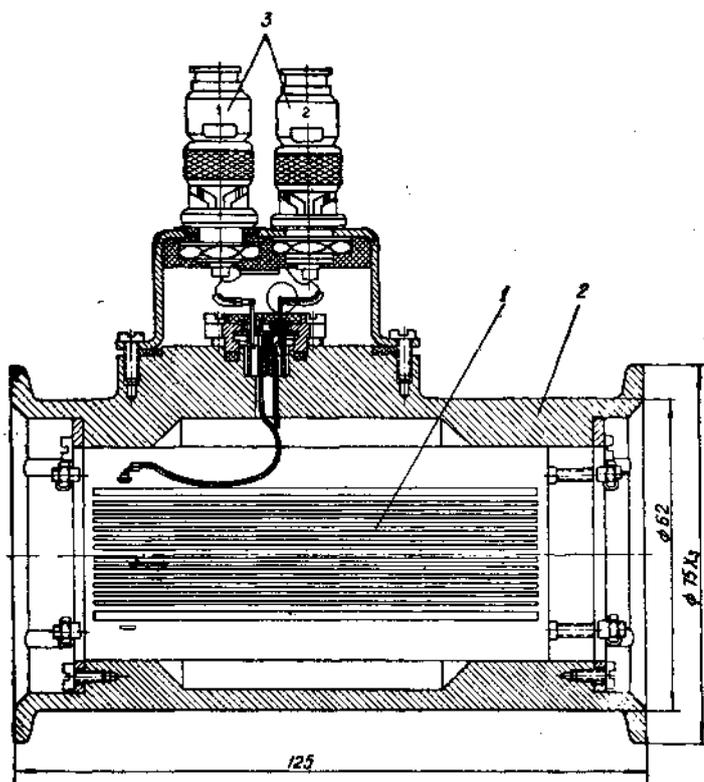


Рисунок 8 – Внутреннее устройство датчика плотномера:
1 – пакет пластин; 2 – корпус; 3 – розетки

На концах корпуса имеются фланцы для крепления с одной стороны к датчику расхода и с другой – к патрубку трубопровода.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Вывести регулятор частоты вращения крыльчатки 7 (см. рисунок 4) в крайнее левое положение.
3. Включить питание осциллографа.
4. Установить регулятор чувствительности канала осциллографа в положение 20 В/дел.
5. Включить питание лабораторного стенда тумблером 1.
6. Определить параметры несущего сигнала в различных участках измерительной цепи:
 - 6.1 Подключить осциллограф к паре гнезд 1 (разъем для снятия осциллограмм 9), с помощью кабеля.
 - 6.2 Установить на осциллографе длительность развертки 0,5–1 мс/дел.
 - 6.3 Снять и зарисовать полученную осциллограмму несущего сигнала. Определить его амплитуду и частоту.
 - 6.4 Подключить осциллограф к паре гнезд 2.
 - 6.5 Установить регулятор чувствительности в положение 100 мВ/дел.
 - 6.6 Снять и зарисовать полученную осциллограмму. Определить амплитуду и частоту несущего сигнала.
 - 6.7 Установить регулятор чувствительности в положение 20 В/дел.

- 6.8 Подключить осциллограф к паре гнезд 3.
- 6.9 Снять и зарисовать полученную осциллограмму. Определить амплитуду и частоту несущего сигнала.
7. В показывающем приборе 2 сместить с помощью кремальеры стрелку нулевого деления на значение 6000 кг. Для перемещения стрелки кремальеру необходимо вращать при нажатии.
8. Подключить осциллограф к паре гнезд 2.
9. Установить регулятор чувствительности в положение 1 В/дел.
10. Повернуть регулятор частоты вращения крыльчатки 7 по часовой стрелке, установив значение на вольтметре 3 равное 5 В и убедиться в работе показывающего прибора 2 по щелчкам электромагнита.
11. Пронаблюдать на экране осциллографа изменение амплитуды несущего сигнала.
12. Зарисовать несущий сигнал с минимальной и максимальной амплитудой.
13. Определить параметры модулированного сигнала:
 - 13.1 Установить на осциллографе длительность развертки 100-200 мс/дел.
 - 13.2 Снять и зарисовать полученную осциллограмму.
 - 13.3 Повторить п. 12.2, установив значение на вольтметре 15 и 25 В, при необходимости уменьшив длительность развертки на осциллографе.
14. На полученных осциллограммах определить основные параметры сигналов.

Лабораторная работа № 12 Исследование схем включения терморезисторов

Цель работы

1. Ознакомиться с различными способами измерения температуры.
2. Ознакомиться с мостовыми схемами включения терморезисторов.
3. Получить зависимость сопротивления терморезисторов и выходного напряжения мостовых схем включения от температуры.

Общие сведения о терморезисторах

Термосопротивлениями (терморезисторами) – называются устройства, основное свойство которых заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Основным элементом термосопротивления является определенной формы проводник (металл) или полупроводник *n*- или *p*- типа электропроводности с двумя невыпрямляющими контактами.

Различают терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), сопротивление которых падает с возрастанием температуры, часто называемые термисторами, и терморезисторы с положительным ТКС, сопротивление которых увеличивается с возрастанием температуры. Такие терморезисторы называются позисторами.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой терморезисторов, в значительной степени, определяющей остальные характеристики этих изделий. Естественно, она аналогична температурной зависимости удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен данный терморезистор.

Уменьшение сопротивления материала с увеличением температуры обуславливается следующими причинами:

- увеличением концентрации носителей заряда;
- увеличением подвижности носителей заряда;
- фазовыми превращениями.

Материалы, из которых делают терморезисторы, должны удовлетворять следующим требованиям: чисто электронная проводимость материала и возможность регулирования ее, стабильность характеристик материала в диапазоне рабочих температур, простота технологии изготовления изделий. Материалы должны быть нечувствительными к загрязнениям в процессе технологического изготовления изделий.

Большое распространение получили CuO , Mn_3O_4 , Co_3O_4 , NiO и их смеси. На основе смесей оксидов меди и марганца получены полупроводниковые материалы с электропроводностью от 10^{-8} до 10^{-1} ($\text{Ом}\cdot\text{см}$)⁻¹.

Также используются окислы титана, ванадия, железа. При изменении соотношения компонентов соответствующих материалов получают заданные значения удельного сопротивления и ТКС.

По конструктивному оформлению терморезисторы можно разделить на следующие типы:

- в виде цилиндрических стержней (КМТ-1, ММТ-1, КМТ-4, ММТ-4);
- в виде дисков (СТ1-17, СТ3-17, СТ5-1);
- в виде миниатюрных бусинок (СТ1-18, СТ1-19 и др.);
- в виде плоских прямоугольников (СТ3-23).

В отличие от понятия «наименование» резистора, применяемого для его характеристики в конструкторской и товаропроизводительной документации, под маркировкой резистора понимают цифры, буквы и символы, наносимые на корпус резистора.

Маркировка содержит лишь самые необходимые и важнейшие сведения о резисторе. Обязательным показателем во всех случаях является номинальное сопротивление.

Характеристики и параметры терморезисторов

Основной характеристикой терморезистора является температурная зависимость его сопротивления. Она совпадает с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен терморезистор. Во всем рабочем диапазоне температур эта зависимость достаточно точно определяется соотношением

$$R_T = A \times \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (1)$$

где R_T - сопротивление терморезистора при температуре T ,
 A - величина, зависящая от материала и геометрических размеров терморезистора,

B - постоянная, характеризующая физические свойства материала.

Записав выражения, аналогичные (1), для двух температур T и T_0 и разделив одно на другое, можно исключить параметр A :

$$R_T = R_0 \times \exp\left(B \times \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right]\right). \quad (2)$$

Соотношение (2) не содержит постоянную величину A . Используя его можно рассчитать величину сопротивления терморезистора при любой температуре, если известны значение постоянной B и сопротивление при какой-нибудь определенной температуре T_0 .

Величину постоянной B легко определить экспериментально, измерив сопротивление терморезистора при двух температурах. Действительно, прологарифмировав выражение (2), получим:

$$B = \ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) \times \frac{T T_0}{T_0 - T}. \quad (3)$$

Постоянную B называют *коэффициентом температурной чувствительности* терморезистора во всем рабочем интервале температур. Сопротивление терморезистора R_0 при определенной температуре (обычно 20 °С) – это *номинальное сопротивление* терморезистора.

Кроме величин B и R_0 , терморезистор характеризуется следующими основными параметрами:

- *температурный коэффициент сопротивления* α_T . Он определяется как относительное изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры на один градус:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} \quad (4)$$

Или, воспользовавшись выражением (1), можно получить следующее соотношение, связывающее α_T с параметром B :

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2} \quad (5)$$

Из последней формулы следует, что зная постоянную B , можно вычислить α_T для любой температуры.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов в десятки раз больше, чем у металлических. Например, сопротивление платинового терморезистора при нагреве его от 0°C до 300°C меняется примерно в два раза. В то же время нетрудно изготовить такой полупроводниковый терморезистор, сопротивление которого при этом изменится в тысячу раз.

- *постоянная времени* τ , отражающая тепловую инерционность терморезисторов. Она равна времени, в течение которого превышение температуры рабочего тела терморезистора над окружающей средой при охлаждении его уменьшится в e ($\sim 2,7$) раз. Величина постоянной времени терморезистора может изменяться от десятых долей секунды до сотен секунд.

- *предельно допустимая мощность рассеивания*. При высоких температурах в полупроводниковом материале терморезистора могут происходить необратимые структурные изменения, в результате которых изменяются параметры прибора. Наибольшую температуру, при которой терморезистор сохраняет стабильность параметров при длительной эксплуатации, называют предельно допустимой. Соответствующую этой температуре мощность рассеяния называют максимальной (предельно допустимой) мощностью рассеяния. Обычно ее указывают для температуры окружающей среды 20°C .

- *коэффициент рассеяния* H , численно равный мощности, отводимой от терморезистора в окружающую среду при разности температур поверхности и окружающей среды в один градус.

Вольтамперная характеристика терморезистора.

Статическая вольтамперная характеристика терморезистора – это зависимость протекающего через терморезистор тока от падения напряжения на нем в условиях теплового равновесия между терморезистором и

окружающей средой. Типичная вольтамперная характеристика терморезистора представлена на рисунке 1. Как видно из этого рисунка, она имеет ярко выраженный нелинейный характер.

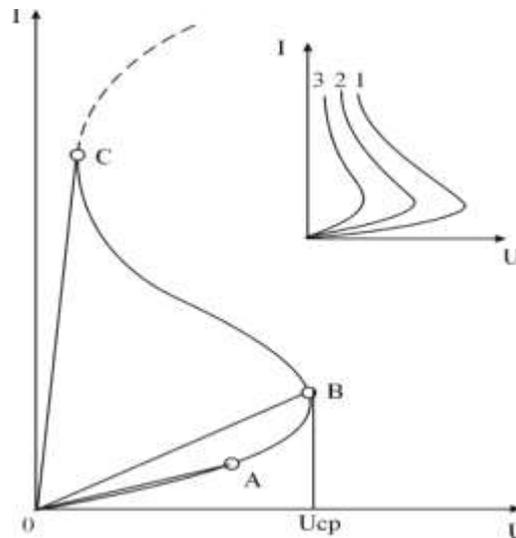


Рисунок 1 – Статическая вольтамперная характеристика терморезистора.

Можно выделить три основных участка: OA , AB и BC . На начальном участке OA , соответствующем относительно малым приложенным к терморезистору напряжениям, вольтамперная характеристика линейна. Это связано с тем, что при малых напряжениях электрическая энергия, выделяемая в терморезисторе, мала и не изменяет заметно его температуру. При дальнейшем увеличении напряжения (участок AB) выделяемая энергия приводит к повышению температуры и уменьшению сопротивления. Это вызывает увеличение тока, что обуславливает дальнейшее повышение температуры терморезистора, уменьшение его сопротивления и дальнейший рост тока. Следствием такой положительной связи по току является на начальном этапе нарушение (участок AB) линейности вольтамперной характеристики, а затем появление участка BC с отрицательным сопротивлением. Дальнейшее увеличение тока (участок выше точки C) снова приводит к росту напряжения на образце. Этот участок соответствует температуре, когда протекающий ток разогревает его до температуры, соответствующей температуре примерного истощения. В этом случае дальнейшее повышение температуры не будет сопровождаться ростом проводимости и напряжение начнет расти с увеличением тока.

Статическое сопротивление терморезистора в любой точке вольтамперной характеристики определяется как котангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат в эту точку. Из рисунка 1 видно, что величина статического сопротивления монотонно убывает с ростом тока, так как

$$\operatorname{ctg}\beta_c < \operatorname{ctg}\beta_b < \operatorname{ctg}\beta_a \quad (6)$$

Вольтамперная характеристика терморезистора может изменяться под влиянием различных причин и, прежде всего, при изменении температуры

окружающей среды. На вставке к рис. 8 представлен качественно вид вольтамперных характеристик терморезистора при различных температурах окружающей среды ($T_1 < T_2 < T_3$). С ростом температуры T напряжение U_{cp} , которому соответствует начало падающего участка вольтамперной характеристики, уменьшается. Вольтамперная характеристика "прижимается" к оси токов и спрямляется. Качественно заключение о характере трансформации вольтамперной характеристики терморезистора при изменении температуры вытекает из анализа соотношения (6). Действительно, предположим, что через терморезистор, находящийся при температуре T_1 протекает постоянный ток. Сопротивление терморезистора в какой-либо точке вольтамперной характеристики при температуре T_1 , соответствующей выбранной величине тока, характеризуется определенным углом β_1 . При повышении температуры сопротивление терморезистора падает. Следовательно, при температуре T_2 угол β_2 должен быть больше угла β_1 . Это означает, что с увеличением температуры выбранная точка на вольтамперной характеристике, снятой при температуре T_1 , должна сместиться влево по шкале напряжений. Аналогичные рассуждения применимы для любой точки вольтамперной характеристики. Результатом их является заключение о том, что при повышении температуры внешней среды вся характеристика смещается влево.

Рассмотрим, как при этом изменяется положение максимума вольтамперной характеристики. Мощность, рассеиваемая в терморезисторе, определяется как электрическими, так и его тепловыми характеристиками. В установившемся режиме вся мощность, выделяемая в рабочем теле терморезистора, рассеивается в окружающую среду. Поэтому

$$P_T = \frac{U_T^2}{R_T} = I_T^2 \times R_T = H(T - T_1) \quad (7)$$

где H - коэффициент теплоотдачи или рассеяния,
 T_1 - температура окружающей среды.

Подставив в (7) значения R_T из (2), получим следующее уравнение вольтамперной характеристики терморезистора в параметрической форме:

$$U_T = \sqrt{H \times R_0 \times (T - T_1) \times \exp\left(\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T}\right)} \quad (8)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{H}{R_0} \times (T - T_1) \times \exp\left(-\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T}\right)} \quad (8^*)$$

Таким образом, вид статической вольтамперной характеристики терморезистора определяется коэффициентом рассеяния H , коэффициентом температурной чувствительности B , номинальным сопротивлением терморезистора R_0 и температурой окружающей среды T_1 .

Значения максимального напряжения U_{cp} и тока в I_{cp} , соответствующего этому напряжению, можно определить, взяв первую производную по T и приравняв ее нулю. В результате получим:

$$T_{max}^2 - B \cdot T_{max} + B \cdot T_0 = 0 \quad (9)$$

Температура терморезистора в точке максимума равна

$$T_{max} = \frac{B - \sqrt{B \cdot (B - 4 \cdot T_0)}}{2} \quad (10)$$

Подставив (10) в (8) получим значения U_{cp} и I_{cp} .

Из выражений (10) и (8) видно, что,

во-первых, статическая вольтамперная характеристика терморезистора будет иметь экстремальные значения напряжения только при условии $B > 4T_0$;

во-вторых, температура терморезистора при экстремальных значениях напряжения не зависит от коэффициента рассеяния. Поэтому максимумы статических вольтамперных характеристик терморезистора, помещенного в различные среды, должны наблюдаться при одних и тех же сопротивлениях терморезистора. Коэффициент рассеяния влияет только на значения напряжения и тока в точке максимума статической вольтамперной характеристики.

в-третьих, при увеличении температуры окружающей среды уменьшается сопротивление терморезистора и снижается максимум статической вольтамперной характеристики терморезистора.

Режимы работы терморезисторов.

В зависимости от сферы применения терморезисторов используются два основных режима их включения в электрическую цепь.

Особенностью **первого режима** является малое напряжение (меньше U_{cp}), прикладываемое к терморезистору. В этом случае ток, протекающий через терморезистор, не вызывает его заметного разогрева. Величина тока определяется по закону Ома:

$$I = U/R_T,$$

где R_T – сопротивление терморезистора, которое зависит только от температуры окружающей среды. *Этот режим используется при измерении температуры с помощью терморезистора.*

Использование терморезисторов в качестве переключателей (второй режим) базируется на так называемом **релейном эффекте**.

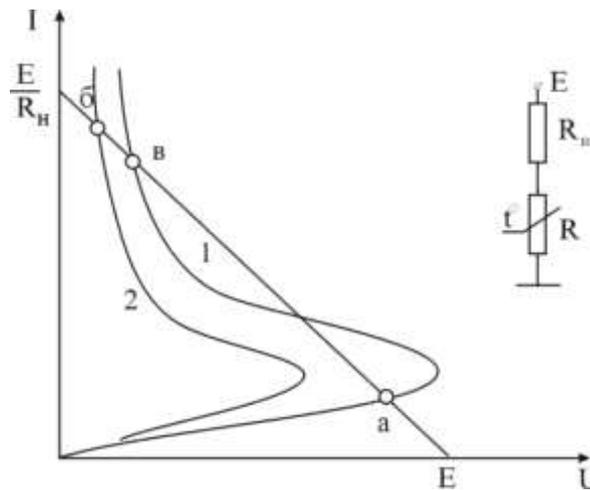


Рисунок 2 – Схема переключателя на основе терморезистора.

Релейным эффектом в цепи, содержащей терморезистор и сопротивление нагрузки R_H , называют резкое нарастание или убывание тока, вызванное изменением сопротивления терморезистора. Величина сопротивления нагрузки и напряжение источника питания выбираются таким образом, чтобы нагрузочная линия пересекала вольтамперную характеристику терморезистора в трех точках. Схематично принцип действия переключателя на основе терморезистора можно пояснить, обратившись к рисунку 2, где приведены вольтамперные характеристики терморезистора, соответствующие температурам окружающей среды T_1 (кривая 1), температуре $T_2 > T_1$ (кривая 2) и линейного элемента R_H .

После включения источника питания устанавливается рабочая точка **a** и в цепи протекает небольшой ток. Как видно из (8) напряжение на терморезисторе уменьшается при повышении температуры окружающей среды или при уменьшении коэффициента рассеяния H . При воздействии какого либо из указанных факторов, например повышении температуры, вольтамперная характеристика терморезистора изменяется от кривой 1 к кривой 2, (см. рис. 9). Рабочая точка перемещается из **a** в **b** и ток в цепи резко увеличивается. При возвращении внешней температуры к первоначальному значению рабочая точка перемещается из **b** в **в** и высокое значение тока в цепи сохраняется. Часто в такой схеме вместо сопротивления нагрузки включается обмотка электромагнитного реле, которое срабатывает при увеличении тока в цепи. Релейный эффект используется в схемах тепловой защиты, температурной сигнализации, автоматического регулирования температуры, а также в устройствах, реагирующих на изменение влажности, скорости потока жидкости и т.д.

Мостовые схемы измерения сопротивления термометров

Для измерения сопротивления используют четырехплечие уравновешенные (ручные или автоматические) и неуравновешенные мосты.

Уравновешенный мост

Уравновешенный мост, принципиальная схема которого приведена на рисунке 3а), используется для определения величины сопротивления при градуировке ТС и при измерениях температуры в лабораторных условиях.

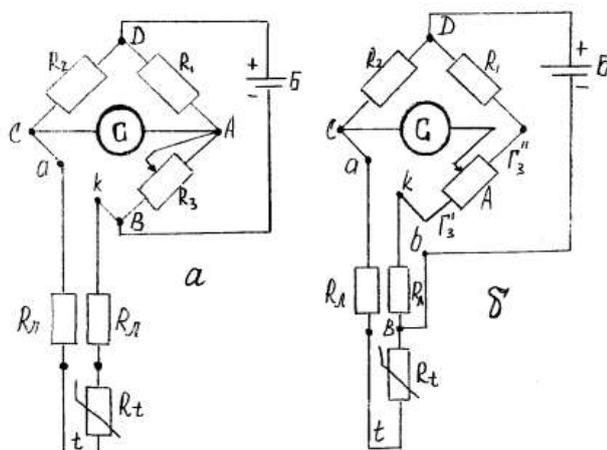


Рисунок 3 – Мостовые схемы

Нулевой метод измерения характеризуется высокой точностью, так как исключается влияние окружающей температуры, магнитных полей и изменения напряжения батареи питания B . Однако значительная погрешность может возникать при изменении сопротивления соединительных проводов $R_{л}$, что вызывается значительными сезонными и суточными колебаниями температуры в местах прохождения кабеля, соединяющего ТС и измерительный мост.

На рисунке 3б) представлена трехпроводная схема включения ТС, в которой одна вершина диагонали питания (B) перенесена непосредственно к термометру. Для равновесия можно записать

$$\frac{R_1 + r_3''}{r_3' + R_{л}} = \frac{R_2}{R_t + R_{л}},$$

откуда

$$R_1 = \frac{R_2 r_3'}{R_1 + r_3''} + \left(\frac{R_2}{R_1 + r_3''} - 1 \right) R_{л}$$

Сопротивление проводов $R_{л}$ оказываются включенными в различные плечи моста, поэтому изменение их величины $\Delta R_{л}$ практически взаимно компенсируются.

Неуравновешенный мост

Неуравновешенный мост исключает необходимость выполнения ручных операций по изменению величины R_3 . В нем вместо нуля-прибора G в диагональ моста AC устанавливается миллиамперметр. При постоянном напряжении питания и постоянных сопротивлениях R_1 , R_2 , R_3 через этот прибор протекает ток, величина которого зависит (нелинейно) от изменения

R_T . Использование данных мостов для измерения температуры ограничено. В основном они применяются для преобразования сопротивления термометра в напряжение.

Автоматические уравновешенные мосты

Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с ТС. Их характеризует высокая точность и возможность использования в системах автоматического регулирования. Они выпускаются различных модификаций: одно- и многоточечные, с дисковой или ленточной диаграммой, с сигнальными устройствами и др.

На рисунке 4 приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста, который, так же как ручной равновесный мост, реализует нулевой метод измерения сопротивления.

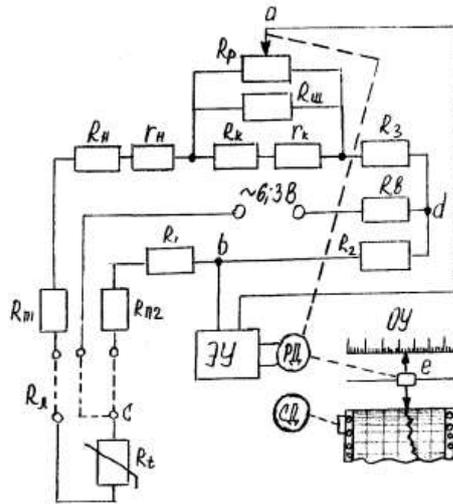


Рисунок 4 – Схема автоматически уравновешиваемого моста

Термометр сопротивления R_t подключен к прибору по трехпроводной схеме. В измерительную схему моста входят уравновешивающий реохорд R_p с шунтирующим его резистором $R_{ш}$ (ограничивает ток, текущий по реохорду); резисторы R_n и R_k , определяющие начало и конец шкалы; спирали r_n и r_k , обеспечивающие точную подгонку диапазона шкалы и являющиеся частью резисторов R_n и R_k ; резисторы R_1 , R_2 и R_3 , образующие постоянные плечи моста; ТС R_t , являющийся переменным плечом; балластный резистор R_6 , который ограничивает ток в мостовой схеме и обеспечивает минимальный нагрев ТС; подгоночные резисторы R_{n1} и R_{n2} , обеспечивающие сопротивление подводящей линии $R_{л}=5$ Ом (каждый из двух соединительных проводов имеет сопротивление 2.5 Ом).

Электронный усилитель переменного тока ЭУ включен в диагональ ab и обеспечивает усиление разбаланса, возникающего в измерительной схеме при изменении сопротивления ТС R_t . Усиленный сигнал поступает на вход

реверсивного двигателя РД, который вращением вала заставляет перемещаться подвижную каретку регистрирующего устройства ϵ и движок реохорда R_p . Вращение вала происходит до тех пор, пока не наступит новое равновесие схемы; напряжение разбаланса станет равным 0, сигнал на входе РД также исчезнет и двигатель остановится.

Питание измерительной схемы моста производится через диагональ d с помощью силового трансформатора ЭУ переменным током напряжением 6.3 В и частотой 50 Гц. Синхронный двигатель СД перемещает диаграммную бумагу относительно пера или печатающего устройства с постоянной скоростью.

Описание лабораторного стенда для исследования характеристик терморезисторов.

Установка для измерения характеристик терморезисторов (рисунок 5) состоит из основания 1, на котором установлена камера 2. В камере 2 смонтированы электронагреватель 3. и исследуемые терморезисторы 4 и термометр 5. Полость камеры 2 заполнена машинным маслом. Для получения объективных результатов терморезисторы располагаются рядом друг с другом и, для уравнивания температуры в камере, применяется мешалка 6. Для быстрого охлаждения масла используется крыльчатка 7.

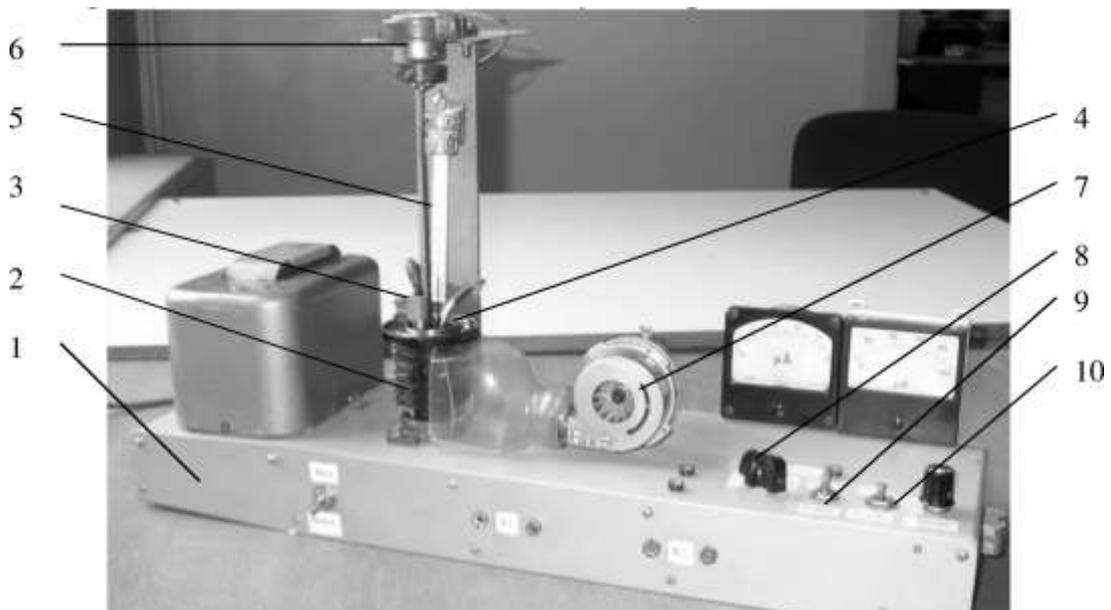


Рисунок 5 – Установка лабораторная, для исследования ВАХ терморезисторов 1 – основание; 2 – камера; 3 – электронагреватель; 4 – терморезисторы; 5 – термометр; 6 – мешалка; 7 крыльчатка; тумблер «Режим»; 9 – тумблер «Нагрев»; 10 – тумблер «Охлаждение».

Электрическая схема (рисунок 6) включает в себя:

схему I измерения параметров терморезисторов R_1 и R_2 в которую входят: вольтметр, два миллиамперметра, нагрузочные сопротивления R_3 , R_4 , источник постоянного напряжения, питающийся от трансформатора Tr_1 .

Переключением тумблера КМ “Режим” (поз 8 см. рис.5) изменяются схемы включения терморезисторов (рисунок 6).

схема II охлаждения масла в камере включает в себя электродвигатель М с выходным валом, которого связана крыльчатка 7 и тумблером SA3 “Охлаждение” (поз 9 см. рис.6).

схема III нагрева масла в камере образована электронагревателем М, питающимся от трансформатора Тр2, и тумблером SA2 “Нагрев” (поз 10 см. рис.6).

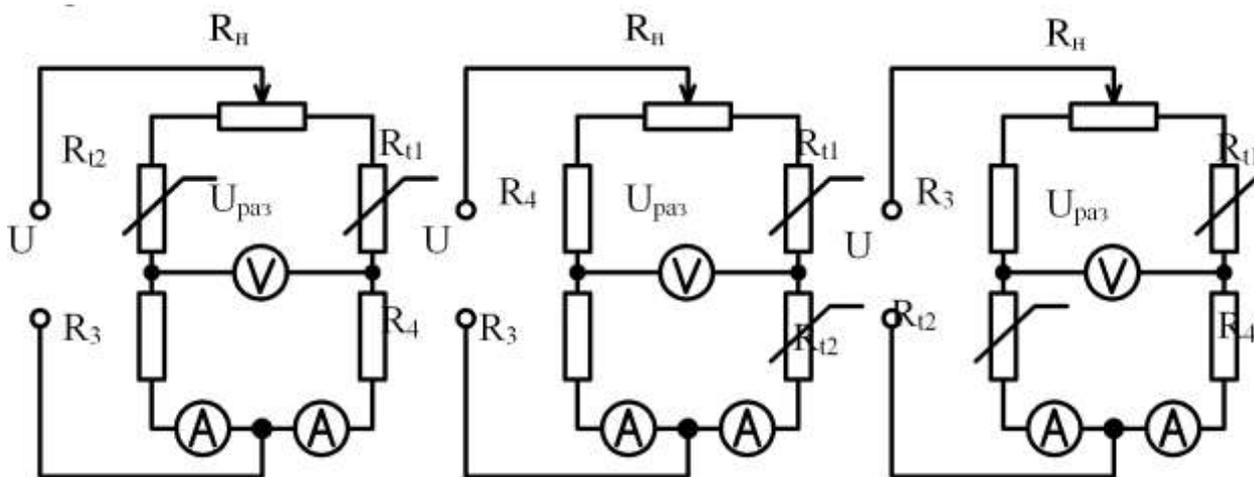


Рисунок 6 – Схемы включения терморезисторов

Температура в камере измеряется термометром 5, рассчитанном на измерение в диапазоне от 0 до 100 °С.

Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Сделать заготовки таблиц для записи результатов:

Таблица 1

t, °С	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм
30		
35		
...		
70		

Таблица 2

t, °С	U ₁ , В	U ₂ , В	U ₃ , В
30			
35			
...			
70			

2. Отключить соединительные провода от гнезд стенда
2. Включить питание вольтметра В7-27 и измерительного стенда.
3. Снять характеристику зависимости сопротивления терморезистора R₁ от температуры $R_1 = f(t)$, где R – сопротивление терморезистора, t – его температура.

Для получения характеристики:

- установить переключатель 8 стенда (рисунок 10) в положение 1;
- переключить вольтметр в режим измерения сопротивления с диапазоном 100 кОм;

– подключить вольтметр к паре гнезд « R_1 » с помощью соединительных проводов;

– включить нагрев тумблером 9;

– снять показания R_1 с вольтметра через каждые 5°C в диапазоне от 30 до 70°C , контролируя температуру по термометру 5. Полученные данные занести в таблицу 1.

4. По достижении 70°C выключить нагрев тумблером 9 и включить охлаждение тумблером 10. После охлаждения до 30°C выключить охлаждение.

5. Получить характеристику зависимости сопротивления второго терморезистора от температуры, $R_2 = f(t)$, действуя аналогично п.3, но подключив вольтметр к паре гнезд « R_2 ».

6. По достижении 70°C выключить нагрев тумблером 9 и включить охлаждение тумблером 10. После охлаждения до 30°C выключить охлаждение.

7. Построить на одном графике зависимости $R_1(t)$ и $R_2(t)$.

8. Переключить вольтметр в режим измерения напряжения с диапазоном измерения 1 В;

9. Подключить вольтметр к паре гнезд « $U_{\text{разб}}$ »;

8. Получить зависимость напряжения U на измерительной диагонали моста от температуры t для трех схем включения терморезисторов ($U_1 = f(t)$, $U_2 = f(t)$ и $U_3 = f(t)$ соответственно).

Для получения характеристики по 1-й схеме:

– установить переключатель 8 стенда в положение 2, соответствующее схеме 1 на рисунке 11;

– вращая ручку «Баланс», добиться показания 0 на вольтметре.

– включить нагрев тумблером 9;

– снять показания U_1 с вольтметра через каждые 5°C в диапазоне от 30 до 70°C , контролируя температуру по термометру 5. Полученные данные занести в таблицу 2.

– по достижении 70°C выключить нагрев тумблером 9 и включить охлаждение тумблером 10. После охлаждения до 30°C выключить охлаждение.

11. Повторить п.8–9 для 3-го и 4-го режима работы (2-я и 3-я схемы соответственно), получив показания U_2 и U_3 .

12. Построить отдельные графики зависимостей $U_1 = f(t)$, $U_2 = f(t)$ и $U_3 = f(t)$.

13. Вычислить для каждого терморезистора средний коэффициент температурной чувствительности B и средний температурный коэффициент α_T терморезисторов по трем значениям температуры (в начале, середине и конце температурного диапазона), используя данные из таблицы 1, по формулам (3) и (5) (значения температуры для использования в формулах должны быть переведены из шкалы градусов Цельсия в шкалу кельвинов).

Лабораторная работа № 13

Измерение деформации с помощью тензорезисторов

Цель работы

1. Изучить принцип действия и конструкции тензорезисторов.
2. Изучить принцип действия мостовой измерительной схемы.
3. Провести измерение показаний измерительной схемы при различных деформациях упругой балки.

Общие сведения о резистивных тензодатчиках

Резистивный тензодатчик (тензорезистор) — это измерительный преобразователь, который изменяет свое сопротивление в результате деформации, возникающей при перемещении контролируемого объекта. Резистивные тензодатчики для медико-биологических применений разбиваются на два класса: 1) металлические и полупроводниковые датчики и 2) эластичные датчики. Первые пригодны для измерения только очень малых перемещений (< 20 мкм) и, как правило требуют приложения довольно значительных сил в процессе измерения. Они широко используются в качестве вторичных преобразовательных элементов при измерениях силы, давления и ускорения. С другой стороны, преобразователи эластичного типа способны измерять большие перемещения, достигающие 50% их длины в исходном состоянии, благодаря чему они особенно подходят для регистрации статических и динамических изменений, происходящих в кровеносных сосудах, камерах сердца и др.

Принципы работы тензодатчика

Сопротивление провода, имеющего площадь поперечного сечения A длину L и удельное электрическое сопротивление Q , определяется выражением

$$R = \frac{QL}{A} \quad (1)$$

При растяжении такого провода площадь его поперечного сечения уменьшается, что приводит к увеличению полного сопротивления провода. Кроме того, поскольку при деформации изменяется кристаллическая (решеточная) структура материала провода, может также измениться и его удельное сопротивление; это, как правило, приводит к еще большему увеличению сопротивления. Оба эффекта учтены в следующем выражении:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(1 + 2\sigma)\Delta L}{L} + \frac{\Delta Q}{Q} \quad (2)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ — относительное изменение сопротивления; σ — коэффициент Пуассона: $\sigma = -(\Delta D/D)/(\Delta L/L)$; $\Delta L/L$ — относительное изменение длины; $\Delta D/D$ — относительное изменение диаметра; $\Delta Q/Q$ — относительное изменение удельного сопротивления.

Первый член в правой части (2) соответствует геометрическим изменениям, второй — изменению удельного сопротивления при деформации (так называемый пьезорезистивный эффект).

Для того чтобы можно было сравнивать рабочие характеристики различных тензочувствительных материалов, вводится коэффициент тензочувствительности материала (часто называемый также чувствительностью к деформации). Он определяется как

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = 1 + 2\sigma + \frac{\Delta Q/Q}{\Delta L/L} \quad (3)$$

Для большинства металлов коэффициент Пуассона равен приблизительно 0,3; поэтому $G \geq 1,6$.

В табл. 1 приведены коэффициенты тензочувствительности и температурные коэффициенты сопротивления для различных тензочувствительных материалов.

Таблица 1. Свойства тензочувствительных материалов

Материал	Состав, %	Коэффициент тензочувствительности	ТКС, °C ⁻¹ ·10 ⁻⁵
Константан (улучшенный)	Ni ₄₅ , Cu ₅₅	2,1	±2
Изоэластик	Ni ₃₆ , Cr ₈ , (Mn, Si, Mo) ₄ , Fe ₅₂	3,52...3,6	+17
Карма	Ni ₇₄ , Cr ₂₀ , Fe ₃ , Cu ₃	2,1	+2
Манганин	Cu ₈₄ , Mn ₁₂ , Ni ₄	0,3...0,47	±2
Сплав 479	Pt ₉₂ , W ₈	3,6...4,4	+24
Никель	Чистый	-12...-20	670
Нихром	Ni ₈₀ , Cr ₂₀	2,1...2,63	10
Кремний	(<i>p</i> -типа)	100...170	70...700
Кремний	(<i>n</i> -типа)	-100...-140	70...700
Германий	(<i>p</i> -типа)	102	
Германий	(<i>n</i> -типа)	-150	

Обратим внимание, что для полупроводниковых материалов коэффициенты тензочувствительности в 50—70 раз больше, чем для металлов. Кроме того, если коэффициент тензочувствительности металла определяется в основном изменениями размеров датчика, то в случае полупроводника

доминирующую роль играет пьезорезистивный эффект. Преимущество полупроводниковых тензодатчиков — более высокое значение коэффициента тензочувствительности; к сожалению, эта положительная характеристика «компенсируется» слишком большим температурным коэффициентом сопротивления.

Типы тензодатчиков

Свободные тензодатчики

Свободный тензодатчик представляет собой провод, натянутый в изолирующей среде, например в воздухе, между двумя точками деформируемого объекта. На рис. 1 показаны четыре таких датчика, расположенные таким образом, что при перемещении движущейся части контролируемого агрегата относительно его неподвижной части два датчика удлиняются и два других — укорачиваются.



Рис. 9.5. Четыре свободных тензодатчика, образующие мостовой телеметрический преобразователь

Исходная растягивающая нагрузка, прикладываемая к тензодатчикам, должна превышать любую ожидаемую сжимающую нагрузку для предотвращения сжатия проводов до провисания. Заметим также, что в датчике может рассеиваться только ограниченное количество тепла, что определяет максимальное прикладываемое к нему напряжение; без этого ограничения по тепловому режиму тепловое расширение проводов в каждом плече моста приводило бы к ослаблению их натяжения.

Приклеиваемые тензодатчики

Приклеиваемый тензодатчик жестко закрепляется на деформируемой поверхности (приклеивается к ней); в качестве тензочувствительного элемента используется металлическая проволока, фольга (пленка), получаемая путем травления (вакуумного напыления), или полоска полупроводника. Нелинейность таких тензодатчиков приблизительно 1%.

Проволочные тензорезисторы

Проволока в виде решетки или сплюснутой спирали находится между двумя слоями бумаги или пленки (рис.1). Материал проволоки выбирается с учетом следующих требований:

1) удельное электрическое сопротивление должно быть высоким, что позволит создать малогабаритные и высокоомные ПИП;

2) температурный коэффициент должен быть, возможно, малым для того, чтобы температурное влияние среды меньше сказывалось на точности измерения, и для упрощения компенсации температурных погрешностей;

3) зависимость между деформацией и сопротивлением должна быть линейной;

4) температурный коэффициент линейного расширения должен быть близким или равным коэффициенту материала исследуемой детали;

5) Т.Э.Д.С. в паре с медью должна быть возможно меньшей, если схема питается постоянным током, так как концы проволочного резистора привариваются к медным выводным проводникам;

6) показатели механической прочности и химической стойкости должны быть высокими;

7) пластичность должна быть достаточной для вытягивания проволоки до микронных размеров.

Диаметр проволоки для ПИП может быть в пределах 0,01...0,05 мм (иногда при малой базе 0,002...0,006мм), база 3...100 мм. Номинальное сопротивление 20...500 Ом (800).

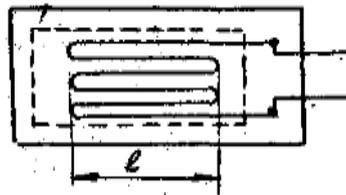


Рис. 1

Температурный диапазон для тензоПИП на бумажной основе – до 325°К, если основа стеклотканевая или органосиликатная, то рабочий диапазон температур до 725°К.

Основой для тензорезисторов бумага, пленка, стеклоткань, стальная полоса толщиной 0,15 мм. Для присоединения к исследуемой детали используют монтажные клеи – БФ2, БФ4, ВЛ-4, ВЛ-931, циакрин, кабринольный, полимерный клей, цементы, лаки, эпоксидные клеи.

Тензорезисторы на стальной полосе привариваются к детали электроконтактной сваркой.

Фольговые тензорезисторы

Фольговые тензорезисторы (рис.2) имеют решетку из тонколистовой константановой фольги толщиной 2...10 мкм на бумажной основе или из синтетической смолы. Толщина бумажной основы 0,08... 0,1 мм.

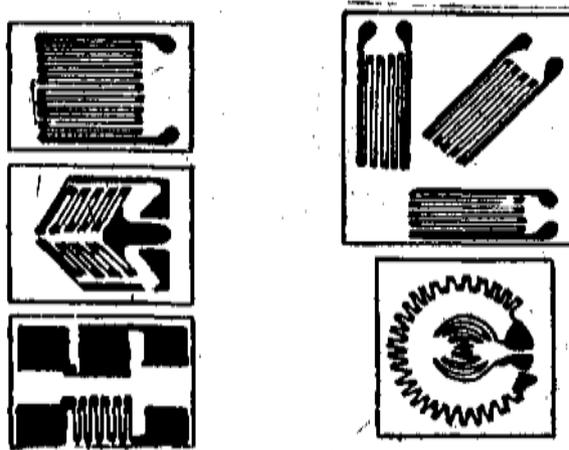


Рис. 2

Главные преимущества фольговых тензорезисторов по сравнению с проволочными следующие:

а) лучшие эксплуатационные и метрологические характеристики – большая площадь сцепления с поверхностью детали и рабочий ток, лучшая теплоотдача, меньшая чувствительность в поперечном направлении, больше выходной сигнал, большая гибкость;

в) лучшие технологические характеристики - уменьшение трудоемкости изготовления за счет применения фотографических процессов химического травления одновременно до 200 изображений решеток, автоматизации многих операций обработки и возможность изготовления решеток любой сложной формы (см. рис. 2).

Полупроводниковые тензорезисторы

Материалом для полупроводниковых тензорезисторов служат германий, кремний и другие. Чувствительный элемент выполняется в виде монокристалла толщиной 0,02...0,05 мм, шириной 0,3...0,5 мм и длиной 2...12 мм, а также диаметром в сотые и десятые доли миллиметра.

Для кремниевых тензорезисторов номинальная тензочувствительность составляет +100...+200 или -100, номинальное сопротивление 90...750 Ом, база 1,4...6,4 мм при длине 2...7 мм, ширине 0,3 мм.

Изменение удельного сопротивления полупроводниковых элементов при деформации в десятки раз больше по сравнению с проводниковыми, что определяет высокую чувствительность преобразователей с большим выходным сигналом. Однако следует учитывать, что для полупроводниковых тензорезисторов характерна большая температурная зависимость сопротивления и чувствительности. При этом для партии преобразователей имеет место большое рассеивание чувствительности в пределах $\pm 10\%$ и сопротивления $\pm 1\%$.

В связи с анизотропией тензочувствительности характеристик в продольном и поперечном направлениях необходимо при конструировании и

изготовлении преобразователей обеспечивать совпадение оси монокристалла с направлением измеряемой деформации.

Допустимые деформации для полупроводниковых тензорезисторов значительно меньше проводниковых, что учитывается при конструировании упругих элементов.

Крепление кристаллов на упругом элементе производится цементом и клеями. В процессе сушки и полимеризации возникают деформации, которые воспринимаются кристаллом и изменяют его показатели. Этот процесс происходит также и во время работы тензорезистора. В этом случае высокая чувствительность тензорезистора позволяет обнаруживать самые незначительные напряжения, возникающие в местах присоединения кристалла, что создает трудности выполнения крепления.

В связи с указанными выше недостатками полупроводниковые тензорезисторы следует применять в тех случаях, когда решающими будут:

- а) высокая чувствительность;
- б) малые размеры.

Мостовые измерительные схемы для тензорезисторов

Мостовые схемы измерения дают высокую точность измерения. Принципиальные схемы измерения с использованием мостов приведены на рис.3. Схема на рис. 3а включает один РПИП, остальные три плеча моста составляют сопротивления $R_2 + R_2'$, $R_3 + R_3'$ и R_4 . Изменяя соотношения R_2 и R_3' добиваются того чтобы в диагонали AB ток был равен нулю, что устанавливается по нульгальванометру, включенному в измерительную диагональ моста.

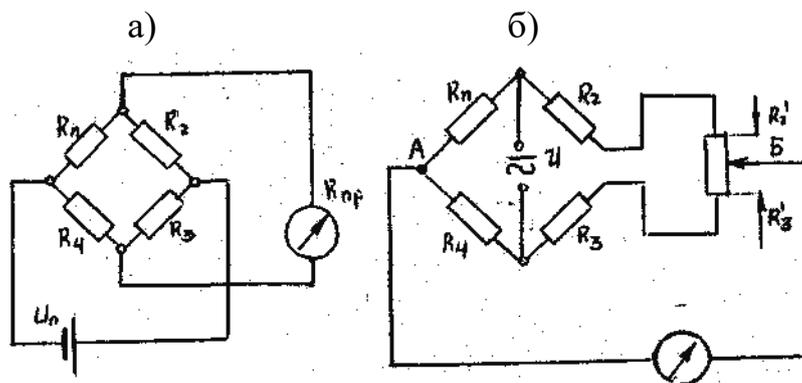


Рис. 3

При токе в диагонали AB , равном нулю, справедливо условие равновесия

$$R_{II} (R_3 + R_3') = (R_2 + R_2') \cdot R_4$$

$$R_{II} = R_4 \cdot \frac{R_2 + R_2'}{R_3 + R_3'}$$

т.е. сопротивление преобразователя в данный момент времени определяется величиной сопротивления плеч моста. Шкала, по которой

определяется положение точки B в момент равновесия, может быть проградуирована в единицах механической величины, измеряемой прибором.

Если сопротивления плеч моста известны с высокой точностью (например, с погрешностью $\pm 0,001\%$), то и R_{Π} будет определено также очень точно. Этому способствует высокая чувствительность гальванометра, фиксирующего отсутствие тока в диагонали, и то, что в момент снятия отсчета ток не протекает через сопротивления, и исключается нагрев их.

Недостатком рассмотренной схемы измерения, которая работает по методу сравнения нулевым способом, является то, что приведение схемы в равновесное состояние, когда ток в диагонали равен нулю, требует некоторого времени. Если измеряемая величина изменяется медленно, то такая схема наиболее рациональна с точки зрения точности. Если измеряемая величина изменяется быстрее, чем вручную, или можно автоматически установить равновесие моста, то переходят на работу по методу сравнения, но дифференциальным способом. Мост в этом случае называется неуравновешенным, а в схеме вместо нуля гальванометра устанавливается амперметр, шкала которого проградуирована в единицах измеряемой неэлектрической величины, или имеются две шкалы: одна - в единицах электрической величины (амперах, миллиамперах), вторая - в единицах измеряемой величины (давления, перемещения, температуры, деформации, ускорения, влажности и т.д.).

Неуравновешенный мост вначале приводится в состояние равновесия при помощи переменных резисторов R_2' и R_3' . При изменении R_{Π} под действием измеряемой величины равновесие моста нарушается, и стрелка прибора отклоняется пропорционально этому изменению. Сигнал разбаланса может быть подан на регистрирующее устройство (на зеркальный гальванометр светолучевого осциллографа, электронный осциллограф, самопишущий амперметр).

Неуравновешенные мосты имеют меньшую точность, так как по сравнению с уравновешенными добавляется еще погрешность измерения показывающего устройства и погрешность регистратора, если производится запись результатов измерения.

Степень разбаланса моста характеризует величину тока в измерительной диагонали, которая определяется (рис. 3б)

$$i_p = U_{\Pi} \cdot \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_{\Pi} (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + (R_3 + R_4) R_1 R_2 + (R_1 + R_2) R_3 R_4}.$$

Если сопротивление прибора R_{Π} велико по сравнению с сопротивлением плеч моста (при включении электронного вольтметра или усилителя с большим входным сопротивлением), то ток i_p очень мал, и тогда измеряется напряжение, величина которого:

$$U_p = U_{\Pi} \cdot \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}.$$

Мосты, чувствительные к напряжению, имеют более линейную характеристику.

Для тензорезисторов изменение сопротивления незначительно, и, следовательно, выходной сигнал также изменяется на малую величину. В этом случае перед показывающе-регистрирующим устройством прибора необходимо установить усилитель.

В схемах с резистивными преобразователями могут быть использованы усилители постоянного тока, усилители переменного напряжения и усилителя несущей частоты.

Усилители постоянного тока просты по устройству, удобны в управлении, имеют широкий частотный диапазон от нуля до 20 кГц. Схема измерения может включать реактивные элементы, проводники большой длины, различные преобразователи математической обработки.

Недостатком усилителей постоянного тока является то, что они имеют большой "дрейф нуля", зависящий от режима работы усилителя и температуры. В настоящее время на базе современных транзисторов и микромодулей созданы усилители постоянного тока с удовлетворительными характеристиками.

Усилители переменного напряжения имеют по частоте нижний порог чувствительности - 10 Гц, что исключает применение их в приборах для измерения медленно изменяющихся величин. Так как тензорезисторы применяются для измерения величин, которые изменяются в широком частотном диапазоне, то к усилителям предъявляются требования постоянства коэффициента усиления в этом частотном диапазоне. Эти усилители подвержены действию различных помех.

Усилители напряжения несущей частоты наиболее часто используются в измерительных схемах, хотя такие усилители более сложны, требуют балансировки схемы по реактивной составляющей, имеют частотные и фазовые искажения.

На рис. 4 показана измерительная схема с использованием усилителя напряжения несущей частоты. Для питания схемы используется переменное напряжение несущей частоты, которая приблизительно на порядок превышает частоту изменения измеряемого параметра. Электрический сигнал, пропорциональный измеряемому параметру, управляет амплитудой напряжения несущей частоты.

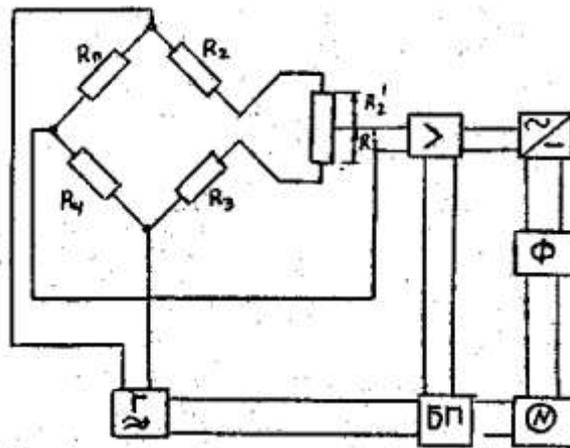


Рис. 4

Таким образом, с измерительной диагонали моста снимается сигнал, который по частоте соответствует несущей, но промодулирован по амплитуде пропорционально измеряемой величине. В этом случае усилитель напряжения несущей частоты будет работать в узком частотном диапазоне. После амплитудной модуляции несущей частоты, с помощью мостовой схемы и усиления несущей частоты необходимо выделить полезный сигнал, т.е. произвести демодуляцию или детектирование сигнала. Таким демодулятором будет выпрямитель, который выделит положительные полуволны несущей частоты, промодулированные полезным сигналом. После этого остается отфильтровать высокочастотные полуволны несущей частоты от низкочастотной составляющей измеряемого сигнала. После фильтра сигнал поступает на показывающее устройство или регистратор.

Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис. 5) представляет собой устройство нагружения упругой балки с помощью аттестованных грузов.

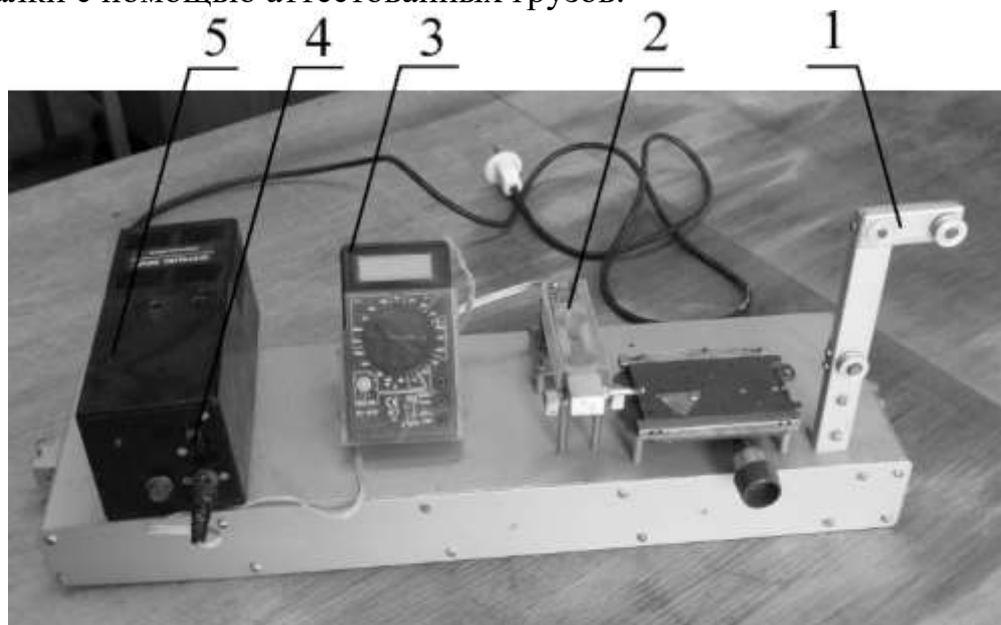


Рис. 5

Стенд состоит из упругой балки 2, которая с помощью проволоки через систему блоков 1 соединена со свободно подвешенной платформой для грузов (на рис. 5 не показана). На балку наклеены четыре проволочных тензорезистора, соединенных по мостовой схеме, образованный ими тензомост подключен к специальному усилителю 5, который осуществляет подачу питающего напряжения на тензомост и снимает сигнал с измерительной диагонали. Усиленный сигнал с усилителя поступает на устройство индикации 3, представляющее собой мультиметр, работающий в режиме измерения постоянного напряжения.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Включить питание стенда (тумблер 4 на рис.5).
3. Записать показание устройства индикации при пустой платформе (U_0).
4. Последовательно добавляя грузы массой m от 1 до 200 грамм на платформу, получить прямую зависимость показаний $U_{\text{абс пр}}$ от суммарной массы грузов $m_{\text{Г}}$ и занести их в таблицу 2.
5. В обратном порядке снимая грузы с платформы, получить обратную зависимость показаний $U_{\text{абс обр}}$ от тех же значений суммарной массы грузов $m_{\text{Г}}$ и занести в таблицу 2.
6. Рассчитать значения напряжений относительно первоначального показания при пустой платформе $U_{\text{пр}}(m_{\text{Г}}) = U_{\text{абс пр}}(m_{\text{Г}}) - U_0$ и $U_{\text{обр}}(m_{\text{Г}}) = U_{\text{абс обр}}(m_{\text{Г}}) - U_0$. Занести полученные показания в таблицу 3.
7. Рассчитать линейные коэффициенты преобразования для прямой и обратной характеристик $k_{\text{пр}} = U_{\text{пр max}}/m_{\text{Г max}}$, $k_{\text{обр}} = U_{\text{обр max}}/m_{\text{Г max}}$.
8. Рассчитать значения выходных напряжений, соответствующие абсолютно линейным характеристикам: $U_{\text{пр т}}(m_{\text{Г}}) = m_{\text{Г}} \cdot k_{\text{пр}}$; $U_{\text{обр т}}(m_{\text{Г}}) = m_{\text{Г}} \cdot k_{\text{обр}}$. Занести полученные значения в таблицу 3.
9. Рассчитать для каждой характеристики отклонение от линейности $\Delta U_{\text{пр}}(m_{\text{Г}}) = (U_{\text{пр т}}(m_{\text{Г}}) - U_{\text{пр}}(m_{\text{Г}}))/U_{\text{пр т}}(m_{\text{Г}})$;
 $\Delta U_{\text{обр}}(m_{\text{Г}}) = (U_{\text{обр т}}(m_{\text{Г}}) - U_{\text{обр}}(m_{\text{Г}}))/U_{\text{обр т}}(m_{\text{Г}})$.
 Занести полученные значения в таблицу 3.
10. Рассчитать значения гистерезиса (разности между прямой и обратными характеристиками): $H(m_{\text{Г}}) = U_{\text{пр}}(m_{\text{Г}}) - U_{\text{обр}}(m_{\text{Г}})$. Занести полученные значения в таблицу 3.
11. Указать максимальные значения отклонения от линейности и гистерезиса.
12. Построить в одних координатах графики зависимостей $U_{\text{пр}}(m_{\text{Г}})$ и $U_{\text{обр}}(m_{\text{Г}})$.

Таблица 2

Лабораторная работа №14

Исследование работы фотокомпенсационного усилителя постоянного тока

Цель работы:

1. Изучить назначение и принципа работы фотокомпенсационного усилителя постоянного тока (ФКУ).
2. Определить коэффициент преобразования ФКУ.

Назначение и принцип работы ФКУ

Электрический сигнал, поступающий от первичного измерительного преобразователя (ПИП), например, термопары, может иметь амплитуду в десятые доли милливольт. В этом случае измерение таких сигналов связано с использованием высокочувствительных приборов, которые должны потреблять из измерительной цепи (цепи термопары) малую энергию. Задача существенно упрощается, если сигнал от ПИП подать на усилитель и после этого измерить его менее чувствительным прибором. В качестве такого усилителя можно использовать ФКУ постоянного тока.

Вместе с присоединенными к их выходу показывающими или регистрирующими приборами позволяют измерять малые токи (от 5 мА) и напряжения (от 0,2 мВ). При этом мощность, потребляемая от измерительной цепи, составляет ничтожно малую величину порядка $5 \cdot 10^{-15}$ Вт, при максимальном значении измеряемой величины. По сравнению с зеркальными гальванометрами время успокоения указателя прибора значительно меньше.

В настоящей работе установлен ФКУ Ф 115, выход которого присоединен к сопротивлению, на котором измеряется падение напряжения с помощью вольтметра. На вход Ф 115 подаётся термоЭДС, развиваемая термопарой.

Усилитель Ф 115 применяется как усилитель тока или напряжения. Пределы измерения по напряжению могут быть 0,2-75 мВ при входном сопротивлении $1 \cdot 10^6$ Ом.

Усилитель можно характеризовать коэффициентом преобразования

$$K = I / U_{\text{вх}}, \text{ мА/мВ,}$$

где I - выходной ток,

$U_{\text{вх}}$ - входное напряжение (в данном случае ЭДС, развиваемая термопарой).

Коэффициент преобразования должен оставаться постоянным для всего предела измерения, что влияет непосредственно на точность измерения. Для усилителя Ф 115 основная погрешность коэффициента преобразования для пределов измерения 0,2-75 В не превышает 0,1%.

Значение K при эксплуатации или после ремонта может измениться, что требует проверки его величины. Пример такой проверки рассматривается в настоящей работе.

Рассмотрим принцип действия ФКУ. Световой поток от осветительной лампы L (рисунок 1) попадает на зеркало гальванометра и, отражаясь, попадает на дифференциально включенный фоторезистор ΦC . Если половины резистора освещены не одинаково, то через внешний прибор, присоединенный к зажимам "Выход", потечет ток I . Направление тока будет зависеть от того, какая из половин резистора освещена больше. В исходном состоянии гальванометр посредством корректора устанавливается в такое положение, чтобы ток в цепи внешнего прибора был равен нулю. Измеряемое напряжение, которое подается к зажимам "вход", сравнивается с падением напряжения на компенсационном резисторе R_k . Если эти напряжения не равны, то по рамке гальванометра потечет ток, и подвижная часть гальванометра с зеркалом придет в движение. При этом изменяется распределение света между половинами фоторезистора и, следовательно, распределение напряжения между ними. Последнее вызывает изменение тока, протекающего через компенсационный резистор R_k . Движение рамки прекращается, когда падение напряжения на компенсационном резисторе уравнивает измеряемое напряжение.

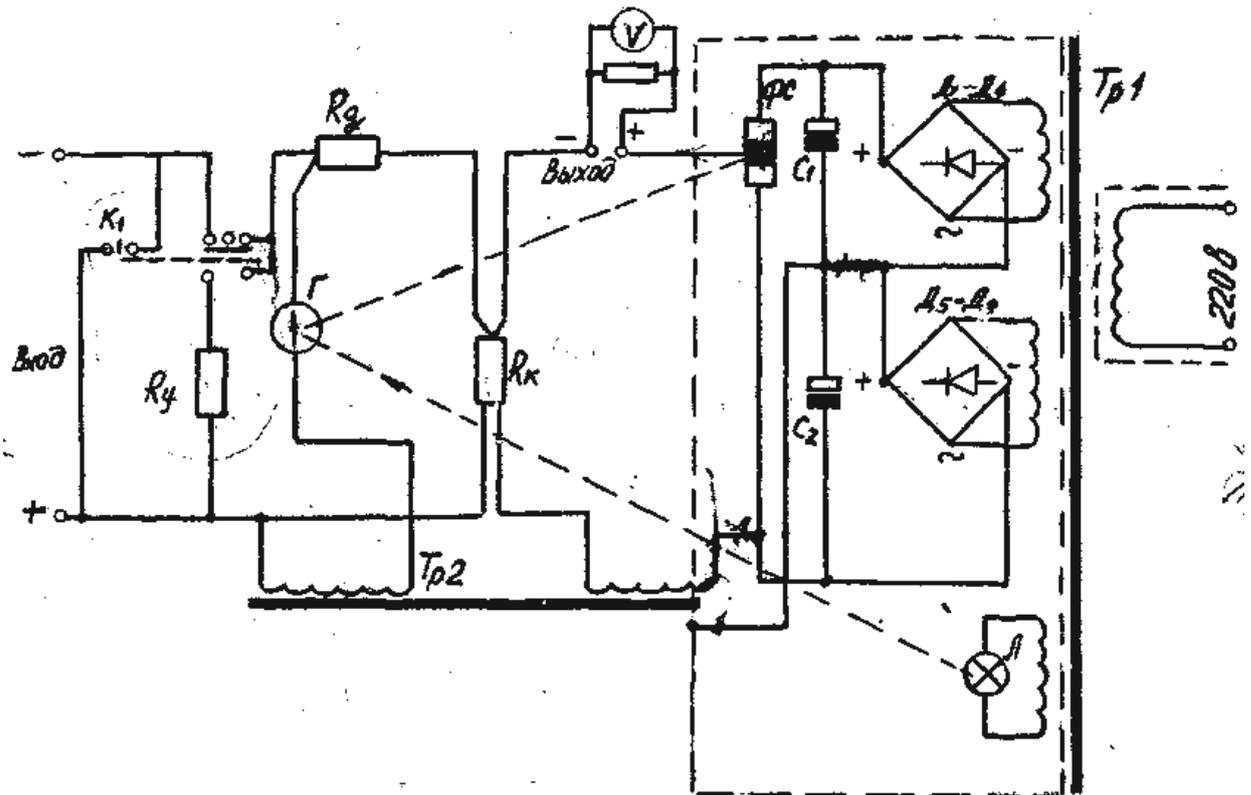


Рисунок 1. Принципиальная схема ФКУ постоянного тока.

G - гальванометр; L - осветительная лампа; ΦC - фоторезистор ФС-К7;
 R_k - компенсационный резистор, R_g - добавочный резистор; R_y - резистор для установки нуля; K_1 - кнопка контроля нуля; T_{p1} и T_{p2} - трансформатор питания и корректирующий.

В результате компенсационный ток устанавливается пропорциональным измеряемому напряжению. Благодаря компенсационной схеме, результат

изменения не зависит от непостоянства параметров фоторезистора и напряжения цепи питания. Изменение этих величин автоматически компенсируется соответствующим поворотом подвижной части гальванометра.

Кнопка K_1 сопротивление R_y служит для установки гальванометра в нулевое положение.

На выходе может быть установлен высокочувствительный прибор, для которого ток полного отклонения указателя составляет десятые доли микроампера, однако при этом возрастает чувствительность усилителя к изменению параметров резисторов, напряжения питания.

При измерении малых напряжений следует источник измеряемого напряжения соединять с усилителем нелужеными медными проводами для исключения возможности появления термоЭДС.

Порядок выполнения экспериментальной части работы

Схема экспериментальной установки показана на рисунке 2. На выходе ФКУ подключается резистор $R=3000$ Ом, падение напряжения на котором измеряется вольтметром U_2 . По показанию U_2 можно определить I . Величина U_{ex} определяется высокочувствительным вольтметром U_1 .

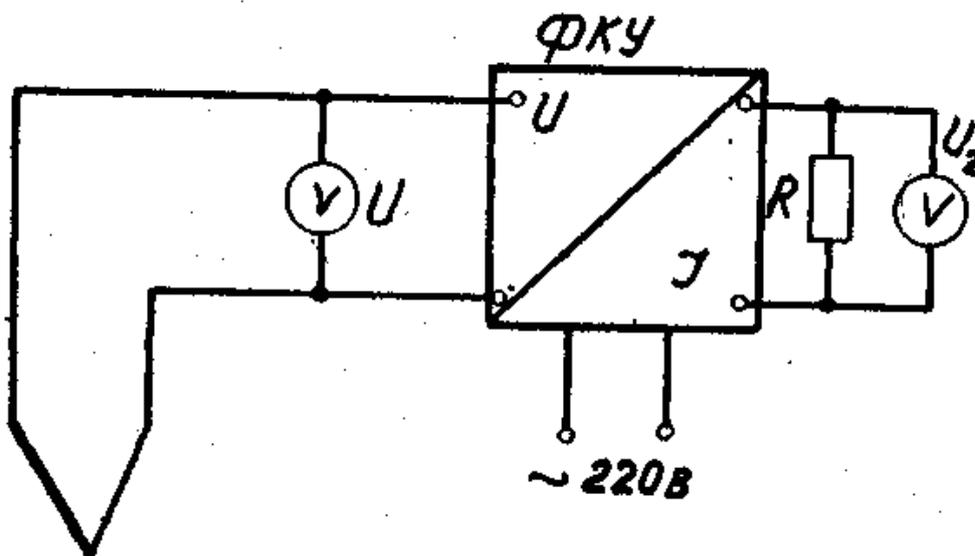


Рисунок 2. Принципиальная схема экспериментальной установки ($R=3000$ Ом)

1. Получить допуск к работе у преподавателя или инженера.
2. Включить ФКУ и вольтметр U_2 (в случае, если применяется цифровой вольтметр) в сеть 220 В.
3. Включить нагреватель печи.
4. Снять показания приборов U_1 и U_2 по мере нагревания термопары от 30°C до 70°C через каждые 5°C .
5. Выключить нагреватель печи.
6. Снять показания приборов U_1 и U_2 по мере охлаждения термопары от 70°C до 30°C через каждые 5°C .

7. Подсчитать среднее значение коэффициентов преобразования при нагреве и охлаждении печки.

III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

Список вопросов к зачету по учебной дисциплине «Элементы приборов»

1. Принцип работы схемы делителя тока.
2. Принцип работы схемы делителя напряжения.
3. Принцип работы мостовой схемы.
4. Методы измерения уравновешенным и неуравновешенным мостом.
5. Включение нескольких датчиков в мостовую схему.
6. Повышение чувствительности и линейности мостовой схемы.
7. Особенности применения мостовых схем для измерения реактивного сопротивления.
8. Методы измерения емкости.
9. Методы измерения индуктивности.
10. Дифференциальные преобразователи.
11. Измерение перемещения реостатом и реохордом.
12. Измерение перемещения индуктивным преобразователем с переменной длиной воздушного промежутка.
13. Измерение перемещения взаимноиндуктивными (трансформаторными) преобразователями.
14. Измерение перемещения индуктивными преобразователями с распределенными магнитными параметрами.
15. Измерение перемещения емкостными преобразователями.
16. Измерение перемещения оптическими датчиками.
17. Измерение угловой скорости датчиками конечного положения.
18. Измерение ускорения.
19. Измерение скорости движения по скоростному напору.
20. Измерение температуры жидкостными термометрами.

Список вопросов к экзамену по учебной дисциплине «Элементы приборов»

1. Классификация и основные характеристики измерительных преобразователей
2. Виды измерительной информации
3. Представление датчика как последовательности измерительных преобразователей. Структурные схемы датчиков.
4. Оптические элементы датчиков
5. Демпфирующие устройства, виды и конструкции
6. Измерительные схемы делителей напряжения и тока
7. Мостовая измерительная схема
8. Методы измерения емкости и индуктивности.

9. Резистивные датчики перемещения: виды и схемы подключения
10. Резистивные датчики перемещения: материалы и параметры
11. Индуктивные датчики перемещения
12. Емкостные датчики перемещения
13. Дифференциальные и мостовые емкостные датчики
14. Ультразвуковые датчики перемещения
15. Оптические датчики перемещения
16. Гравитационные датчики угла наклона
17. Датчики конечного положения
18. Измерение линейной скорости по скоростному напору
19. Импульсные датчики угловой скорости
20. Центробежные, тахометрические и магнитоиндукционные датчики угловой скорости
21. Датчики Холла
22. Методы измерения ускорения
23. Жидкостные термометры: виды и конструкции
24. Дилатометрические термометры
25. Манометрические термометры
26. Терморезисторы
27. Термопары
28. Пирометрические термометры
29. Упругие элементы для преобразования силы: виды и характеристики
30. Упругие элементы для преобразования силы: параметры и функции преобразования
31. Упругие элементы для преобразования давления: виды и характеристики
32. Упругие элементы для преобразования давления: параметры и функции преобразования
33. Упругие элементы для преобразования силы и давления
34. Материалы упругих элементов
35. Тензорезистивные датчики
36. Пьезоэлектрические датчики
37. Датчики крутящих моментов
38. Расходомеры
39. Датчики давления
40. Датчики уровня
41. Расходомеры
42. Датчики влажности
43. Акустические датчики
44. Датчики света
45. Датчики измерения химических величин

IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Перечень учебников и учебных пособий, рекомендуемых к использованию в образовательном процессе

1. Бриндли, К. Измерительный преобразователи: справочное пособие / К. . Бриндли. - М. : Энергоатомиздат, 1991. - 144 с.
2. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества / П. П. Кремлевский. - СПб. : Политехника, 2002. - 409 с.
3. Виглеб, Г. Датчики / Г. Виглеб. - М. : Мир, 1989. - 196 с.
4. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. - Киев : Наукова думка, 1965. - 304 с.
5. Основы метрологии и электрические измерения: учебник для вузов / Б. Я. Авдеев [и др.]. - Л. : Энергоатомиздат, 1987. - 480 с.
6. Левшина, Е. С. Электрические измерения физических величин: измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. - Л. : Энергоатомиздат, 1983. - 320 с.
7. Полищук, Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Полищук. - Киев : Вища школа, 1981. - 296 с.
8. Крамарухин, Ю. Е. Приборы для измерения температуры / Ю. Е. Крамарухин. - М. : Машиностроение, 1990. - 208 с.
9. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. - М. : Машиностроение, 1979. - 480 с.
10. Антонец, И. В. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учебное пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенок. - Ульяновск : УлГТУ, 2013. - 121 с.
11. Фрайден, Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. - Москва : Техносфера, 2005. - 592 с.
12. Современные датчики. Справочник / под общ. ред. В. М. Шарапова, Е. С. Полищука. - Москва : Техносфера, 2012. - 624 с.