

Г.Н. Лукьянов
СЕНСОРЫ И ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН



Санкт-Петербург
2020

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Г.Н. Лукьянов
**СЕНСОРЫ И ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ
ВЕЛИЧИН**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки (специальности) 12.04.01 Приборостроение
(Магистратура) в качестве учебного пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования (магистратуры)**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2020

Г.Н. Лукьянов, Сенсоры и датчики физических величин – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 57 с.

Рецензент: Коняхин И.А., д.т.н., профессор

Датчики и сенсоры играют важную роль в информационно-измерительных системах (ИИС). От информации о процессах, которая и получается с помощью датчиков, зависит результат работы ИИС. Функционирование датчиков основывается на законах физики и всегда сопряжено с взаимодействием датчика со средой. Многообразие физических процессов и соответствующих им датчиков не позволяет рассмотреть все возможные датчики в одном учебном пособии. Поэтому здесь рассмотрены датчики оптического излучения, магнитного поля, скоростей газа, температуры, давления и расхода. При этом рассматриваются контактные и неконтактные, оптические методы измерения температуры. Задача учебного пособия – дать представление об этих методах. Для облегчения понимания в пособии приводится ряд практических примеров. Пособие предназначено для использования при изучении курса «Сенсоры и датчики физических величин» и научно-исследовательских работ по программе подготовки магистров по направлению 12.04.01 Приборостроение



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020 © Лукьянов Г.Н. 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ФОТОДИОДЫ.....	6
1.1 PIN-диоды.....	9
1.2 Фототранзисторы.....	9
1.3 Фоторезисторы.....	10
1.4 Оптопары.....	11
1.4.1 Оптические детекторы дыма.....	12
2. ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	13
2.1 Эффект Холла.....	13
2.2 Пример применения датчика Холла. Измерение углов.....	15
3 ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ГАЗА	15
3.1 Термоанемометрия.....	15
4 ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	17
4.1 Температура.....	17
4.2 Температурные шкалы.....	18
4.2.1 Шкала Фаренгейта.....	18
4.2.2 Шкала Цельсия.....	18
4.2.3 Эмпирические шкалы.....	18
4.2.4 Термодинамическая шкала температуры.....	19
4.2.5 Международная температурная шкала (МТШ).....	20
4.3 Термоэлектрический ряд металлов.....	20
4.4 Термоэлектричество.....	21
4.5 Стандартные термопары.....	26
4.6 Термометры сопротивления.....	27
4.6.1 Металлические термометры сопротивления.....	27
4.6.2 Полупроводниковые термометры сопротивления.....	28
4.6.3 Схемы включения термометров сопротивления в измерительную схему. Потенциометрическая схема. Мостовая схема.....	29
4.7 Законы излучения	34
4.8 Применение законов излучения для измерений температур.....	36
4.8.1 Яркостная температура	37
4.8.2 Цветовая температура (температура спектрального отношения).37	
4.8.3 Радиационная температура.....	38
5 ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ.....	39
5.1 Абсолютное, относительное (избыточное) и дифференциальное давление.....	40
5.2 Методы измерения давления и типы датчиков их реализующие.....	41
5.2.1 Емкостные датчики давления.....	41
5.2.2 Датчики на основе пьезорезистивного эффекта.....	42
6 ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ.....	44
6.1 Измерения расхода на основании закона Бернулли.....	45
6.2 Вихревые расходомеры.....	47
6.3 Ультразвуковые расходомеры.....	48
6.3.1 Некоторые особенности распространения ультразвука.....	48

6.3.2 Расходомеры на основе эффекта Доплера.....	49
6.3.3 Расходомер на основе измерения времени прохождения звука...50	
6.4 Электромагнитные расходомеры	52
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	53
ЛИТЕРАТУРА.....	54

ВВЕДЕНИЕ

Сенсор - преобразователь физической величины, например, температуры, яркости или давления в другую, легко оцениваемую величину. Обычно выполняется преобразование в электрический сигнал: в напряжение, в ток или в частоту. Слово «сенсор» происходит от латинского «sensus» («чувство», «ощущение»). Работа многих сенсоров основана на разработках из полупроводниковых технологий. Сигнал сенсора усиливается и обрабатывается таким образом, чтобы его можно было далее обработать на компьютере. Многие сенсоры имеют встроенный усилитель и управляющую электронику и могут быть подключены непосредственно к микроконтроллеру. Многие сенсоры обладают цифровым выходом.

При разработке микромеханики механические компоненты сенсора также интегрированы в кремниевый чип. Прежде всего, это мембраны, пружины или вибрирующие тела, которые интегрированы в кремний. Также уже реализованы вращения и перемещения. Хорошие механические свойства кремния, в частности его высокая упругость, выгодно сочетаются в микромеханике с конкретными электрическими свойствами кремния. Классификация сенсоров основана, главным образом, на физических величинах, которые должны быть измерены, а во-вторых, на принципе работы или применения. Имеются сенсоры для многих физических величин:

- **Геометрические** величины: положение, расстояние, длина, траектория, деформация, наклон, скорость, ускорение, угол поворота, вращение и свойства поверхности различных деталей;
- Величины, **связанные с силой**: сила, вес, давление, крутящий момент и механическая сила;
- Величины **перемещения** вещества: расход и уровень газов, жидкостей и твердых веществ;
- **Температура**: температура, тепловое излучение и количество тепла;
- **Оптические** величины: мощность излучения, энергия излучения, яркость и фотометрические величины, такие как световой поток, количество света, интенсивность света, яркость, интенсивность освещения;
- **Звуковые** волны: звуковое давление, звуковая энергия, громкость и частота звука;
- **Электрические** величины: напряжение, ток, электрическая энергия и электрическая мощность, а также напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля и электромагнитное излучение;
- **Радиоактивное** излучение: рентгеновское или гамма-излучение, альфа- и бета-излучение;
- **Анализ химических веществ**: газы, ионы, вода в разных состояниях влажности, точки росы и сенсоры обледенения.

Датчики также можно различить **по типу выходного сигнала**: **Бинарные** сенсоры генерируют только два выходных сигнала «включено» и «выключено». Переключение между этими состояниями происходит при определенных заданных значениях измеряемых физических величин.

Обычно значение точки включения отличается от значения точки выключения. Разница между этими пороговыми значениями называется гистерезисом. Гистерезис уменьшает частоту переключения и приводит к улучшению стабильности системы. Система перестает реагировать на шумы. **Аналоговые сенсоры** генерируют непрерывно меняющийся электрический сигнал при таком же изменении измеряемой физической величины. Соотношение между физической величиной и сигналом сенсора не обязательно должно быть линейным, но в отличие от бинарных датчиков всегда позволяет сделать вывод о текущем значении измеряемой физической величины. Как уже говорилось, значение выходного сигнала также может быть предоставлено в виде цифрового кода, например, через интерфейс I2C или SPI.

Цифровые сенсоры имеют на выходе цифровой код.

Преобразователь напряжение - ток

При подключении сенсоров часто возникает проблема, заключающаяся в том, что между сенсором и измерительным устройством или компьютером лежит относительно большое расстояние. Поэтому существует риск искажения сигнала от датчика на этом расстоянии (влияние помех, сопротивление линии и т. д.). Это можно исправить только конструктивно. С одной стороны, это достигается за счет использования экранированных кабелей между датчиком и электроникой, причем последняя должна располагаться как можно ближе к датчику. Расстояние до цифро-аналогового преобразователя может тогда покрываться с более высоким напряжением или с применением трансформаторов напряжения или тока. В промышленности применяют два стандарта для выходного аналогового сигнала:

- выход с напряжением в диапазоне 0.,,10В;
- токовый выход в диапазоне 0. , , 20 мА или 4. , , 20 мА.

Все, о чем говорится во введении, в объеме одного учебного пособия рассмотреть не представляется возможным. С другой стороны, производители сенсорной техники выпускают не только подробные описания своих устройств с рекомендациями по применению (так называемые datasheet), но и написанные на высоком техническом уровне справочные книги, находящиеся в свободном доступе в интернете, как, например [5]. К сожалению, сегодня не хватает литературы с описанием физических принципов функционирования датчиков и связанных с этим особенностей их применения. Поэтому в этом учебном пособии упор сделан именно на это обстоятельство.

1. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ФОТОДИОДЫ

Когда свет падает на полупроводниковый кристалл, электроны переходят из валентной зоны в зону проводимости и возникают свободные электроны и дырки, т.е. носители положительного и отрицательного заряда. Возбуждение носителя заряда фотоном возможно только когда энергия

фотона E не меньше, чем энергия активации свободных носителей заряда в данном полупроводнике (рисунок 1).

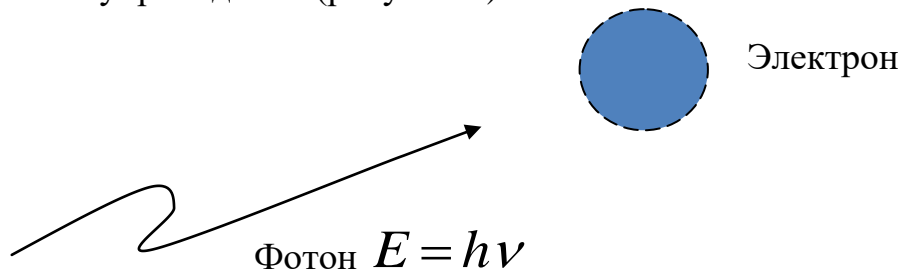


Рисунок 1 – Возбуждение электрона фотоном

Для собственных полупроводников это $h\nu \geq \Delta E$, для примесных $h\nu \geq \Delta E_{np}$. Поэтому существует граничная частота $\nu_{гр}$, для которой фотопроводимость еще наблюдается, при меньших частотах ($\nu < \nu_{гр}$) она отсутствует. Эта граничная частота $\nu_{гр}$ называется красной границей фотопроводимости.

В таблице свойств полупроводников энергия запрещенной зоны лежит в границах от 0,08 эВ (Sn) до 2,4 эВ (CdS). Этим значениям соответствует область спектра от красной границы видимого диапазона до ИК. Можно рассмотреть пример.

Пусть $\Delta E = 2$ эВ, тогда

$$\nu_{cp} = \frac{\Delta E}{h} = \frac{3,2 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 0,483 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$$

и

$$\lambda_{cp} = \frac{c}{\nu_{cp}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,483 \cdot 10^{15}} \approx 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,62 \text{ мкм}$$

Если свет падает на PN-переход, то происходит разделение носителей заряда: электроны движутся в N-область, дырки в P-область. Возникает разность потенциалов, которая растет с ростом освещенности по логарифмическому закону до уровня насыщения около 0,6 В (для кремния).

Напряжение не зависит от площади поверхности диода. Если диод короткозамкнут, течет ток, пропорциональный освещенности и облучаемой площади – фотодиод становится генератором тока. Этот эффект может использоваться, с одной стороны, для измерения интенсивности света, с другой стороны, для генерации электрической энергии.

Если к диоду приложить напряжение обратного смещения, ток через него не будет течь до тех пор, пока диод не будет освещен (рисунок 2). Если свет падает на PN-переход, то генерируются дополнительные носители заряда, и возникает ток, пропорциональный освещенности. Два типа включения показаны на рисунке 2.

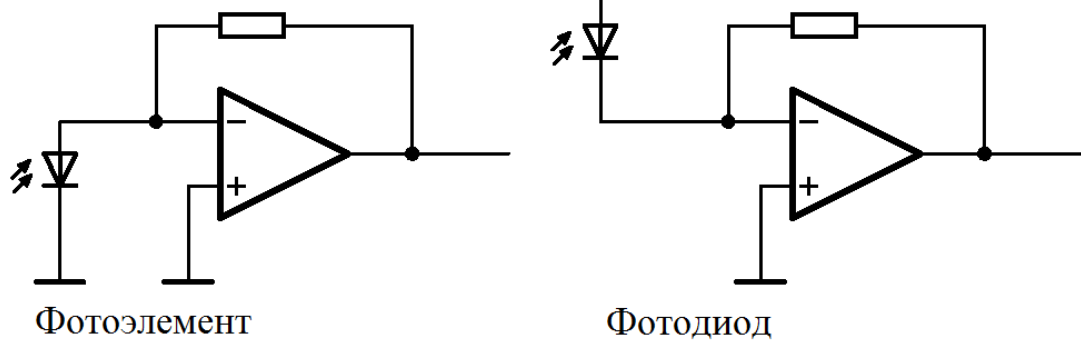


Рисунок 2 – Схемы включения фотодиода

При работе с источником напряжения (рисунок 2, справа) через диод протекает малый ток утечки, который увеличивается с ростом напряжения или температуры. Диод функционирует как фоточувствительный резистор, обратный ток пропорционален интенсивности падающего света. Ток утечки действует как шум и устанавливает нижний предел обнаруживаемой интенсивности света. При работе с источником напряжения возникает смещение, и время нарастания и спада ниже, чем при использовании диода, как источника тока (рисунок 2, слева), и могут быть обнаружены более высокочастотные сигналы. На схеме рисунок 2, слева диод действует как источник тока, пропорциональный интенсивности света. При этом шумы ниже, так как нет утечки, а чувствительность выше. Однако в режиме работы в качестве источника тока полоса частот уже.

Диапазон длин волн, в котором фотодиод воспринимает излучение, как показано выше, определяется шириной запрещенной зоны полупроводника, следовательно, материалом. Например, спектральная чувствительность кремниевых диодов лежит в диапазоне от 400 до 1100 нм (0,4...1,1 мкм), рисунок 3.

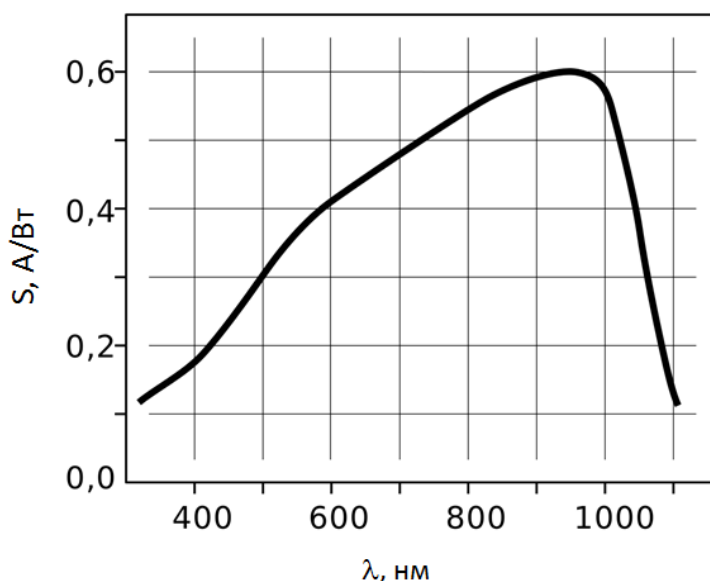


Рисунок 3 - Сспектральная чувствительность кремния

При более длинных волнах энергия не достаточна для освобождения носителей заряда из валентной зоны. При уменьшении длины волны глубина проникновения излучения падает. В УФ-диапазоне излучение проникает только в поверхностный слой и достигает лишь небольшой части барьерного слоя.

Специально построенные кремниевые фотодиоды с повышенной чувствительностью к синему цвету работают от 300 нм. Для измерений в ИК-диапазоне с $\lambda > 1100$ нм применяют германиевые фотодиоды и разновидности соединений индия (InSb) и др., как, например, PbS.

1.1. PIN-диоды

Чтобы получить максимально возможную чувствительность для фотодиодов, барьерный слой располагают как можно ближе к поверхности. Чип изготавливают из кремния N-типа, на поверхности которого путем диффузии образуют тонкий слой кремния P-типа.

Глубина проникновения электромагнитных волн в полупроводниковые кристаллы резко падает с уменьшением длины волны. Но барьерный слой настолько тонкий, что большая часть световой энергии генерирует носители заряда в глубине кристалла, где они не могут быть использованы. Поэтому для повышения чувствительности на многих фотодиодах между P-слоем и N-слоем, образуют также еще и так называемый I -слой (от «intrinsic» - собственный), изготовленный из высокочистого кремния.

Эти, так называемые PIN-диоды (Positive Intrinsic Negative Diode), более чувствительны, чем обычные диоды PN, и из-за их меньшей емкости перехода они работают на гораздо более высоких частотах сигнала.

Поскольку слои P и N не находятся в прямом контакте, образование блокирующего напряжения приводит к образованию большей зоны пространственного заряда, чем в классическом PN-диоде. Поскольку I-слой содержит только мало свободных носителей заряда, его сопротивление очень велико.

1.2. Фототранзисторы

Если в металлическом корпусе транзистора проделать окно, то получится фототранзистор (рисунок 4). Свет должен упасть на область базы. Чувствительность фототранзистора выше, чем у соответствующего фотодиода, в β - раз (β - коэффициент усиления по току транзистора). Однако частота среза значительно ниже (из-за процессов заряд-разряд емкости между коллектором и базой).

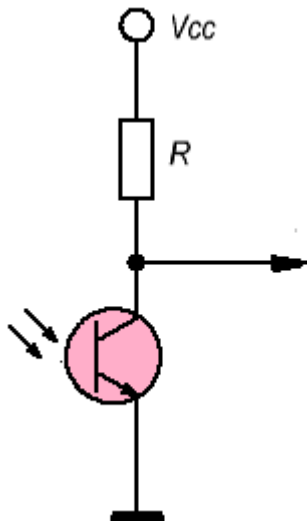


Рисунок 4 – фототранзистор

1.3. Фоторезисторы

Light Dependent Resistors, LDR являются светочувствительными полупроводниками на основе, например, сульфида кадмия (CdS). В темноте количество свободных носителей заряда очень мало и сопротивление очень велико. Световая энергия освобождает носители заряда и сопротивление фоторезистора падает, он начинает пропускать ток. Типичные значения темнового сопротивления находятся в диапазоне МОм, если фоторезистор освещен, то сопротивление имеет величину от 100 до 1000 Ом . Спектральные чувствительности некоторых фоторезисторов приведены на рисунке 5.

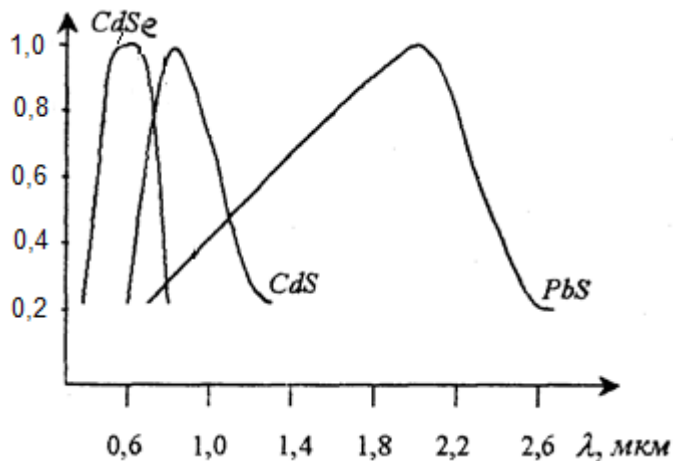


Рисунок 5 - Спектральные чувствительности фоторезисторов (<https://lektsii.org/8-68794.html>).

Если $\nu > \nu_{\text{гр}}$, то часть энергии фотона ($\Delta E = h\nu_{\text{гр}}$) расходуется на перевод электрона в зону проводимости, другая часть ($h\nu - \Delta E$) идет на увеличение кинетической энергии электрона, что ведет к нагреву кристалла. Начинает увеличиваться коэффициент поглощения α , и излучение начинает поглощаться в тонком поверхностном слое полупроводника. Изменение сопротивления этого тонкого поверхностного слоя не вносит заметный вклад

в увеличение сопротивления всего объема полупроводника. На рисунке 6 $\alpha(\lambda)$ - поглощение, $\rho(\lambda)$ – фотопроводимость.

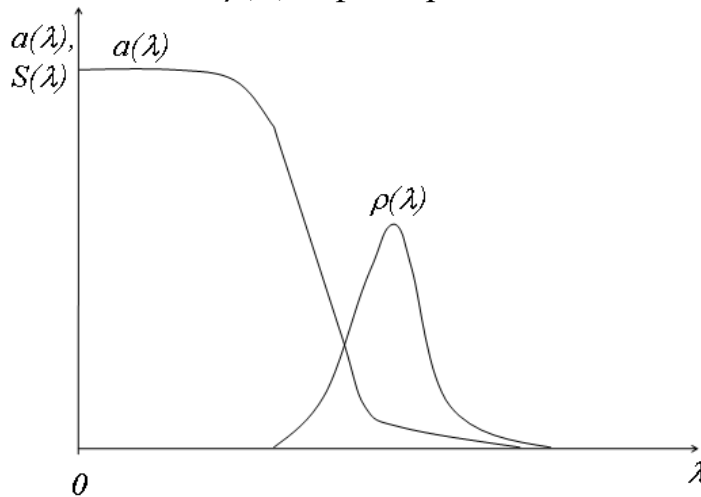


Рисунок 6 - $\alpha(\lambda)$ - поглощение, $\rho(\lambda)$ – фотопроводимость

1.4. Оптопары

Оптопара содержит два основных элемента: передатчик (излучатель) и приемник излучения. В качестве передатчика обычно используются светодиоды. Приемниками являются фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры, фотосимисторы и т.д. Оптоэлектронные сенсоры можно условно разделить на три категории (рисунок 7):

- Сенсоры с отдельным передатчиком и приемником;
- Фотоэлектрические сенсоры, в которых излучатель и приемник находятся в одном корпусе;
- Сенсоры, воспринимающие отраженное от объекта излучение.



Рисунок 7 - Примеры оптоэлектронных сенсоров. Слева - с отдельным передатчиком и приемником, в центре - излучатель и приемник в одном корпусе, справа - воспринимающие отраженное от объекта излучение.

Широко применяют сенсоры, у которых излучатель и приемник находятся в одном корпусе с промежутком между ними от 1 мм до 20 мм, в зависимости от применения. Объект в промежутке прерывает оптическую связь и вызывает изменение выходного сигнала.

У сенсоров, воспринимающих отражение от объекта, оптические оси излучателя и приемника смотрят наружу. Излучение отражается от объекта,

который находится на некотором расстоянии от сенсора, и отраженный сигнал попадает на приемник. Такие устройства применяют, например, для измерений расстояния.

Схема включения оптопары с приемником – фототранзистором приведена на рисунке 8.

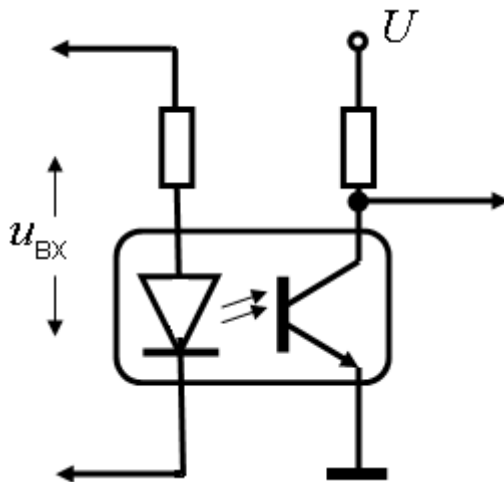


Рисунок 8 - Схема включения оптопары

1.4.1. Оптические детекторы дыма

Оптические детекторы дыма являются одним из возможных примеров применения оптопар. Используют эффект рассеянного света. Если в воздухе есть частицы дыма, свет от источника излучения (от светодиода) рассеивается на них или поглощается, что приводит к срабатыванию сигнализации. Существуют следующие типы датчиков дыма:

1. Детектор рассеянного света. Реагирует на свет, рассеянный дымом.
2. Линейные детекторы дыма.

В детекторе рассеянного света фотоприемник расположен так, что он не может принимать прямой свет от источника. Без дыма свет полностью поглощается в воздухе. Если частицы дыма находятся в области световых лучей, свет отражается от них и попадает на фотоприемник. Уровень сигнала определяется плотностью дыма и оптическими свойствами частиц дыма.

В линейном детекторе дыма передатчик излучает сфокусированный луч света. Без дыма луч света по пути к приемнику не поглощается. Дым частично поглощает и частично рассеивает свет. Таким образом, только часть излученного света достигнет приемника. Величина сигнала пропорциональна средней плотности дыма на пути луча. Линейные детекторы дыма используются для измерения на дистанции от 5 до 100 метров. Этот тип детекторов дыма в основном используется только в промышленности. Им свойственны ложные срабатывания, так как частицы дыма могут различаться как по степени яркости, так и по размеру, Чтобы уменьшить вероятность ложного срабатывания, используют два излучателя и два приемника на двух разных длинах волн, например с использованием красного и синего светодиодов.

2. ДАТЧИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1. Эффект Холла

Принцип действия датчиков Холла основан на эффекте Холла (1879 г.): отклонение зарядов в проводнике от первоначального направления в магнитном поле. Обусловлен силой Лоренца, действующей на электроны при наличии внешнего магнитного поля. Эта сила перпендикулярна к направлению скорости электронов и к вектору магнитной индукции. Появляется дополнительное напряжение, которое называется «напряжением Холла», приводящее к появлению дополнительного электрического поля (рисунок 9).

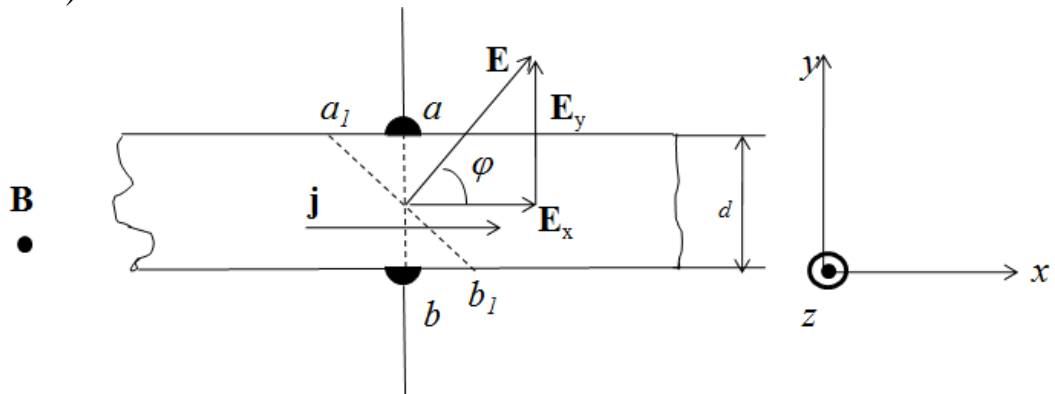


Рисунок 9 - Эффект Холла

Пусть имеется однородный и изотропный проводник в виде прямоугольного параллелепипеда с электродами a и b на его гранях. Поместим его в систему координат $x y z$. Направим вектор плотности тока \mathbf{j} вдоль оси x , вектор магнитной индукции \mathbf{B} вдоль оси z .

При отсутствии магнитного поля направление напряженности электрического поля \mathbf{E} в проводнике совпадает с направлением \mathbf{j} . Напряжение между контактами a и b $u=0$.

При появлении поперечного магнитного поля между контактами a и b появляется напряжение u , меняющее знак при изменении направления тока или магнитного поля.

Появление этого напряжения говорит о том, что в присутствии магнитного поля в проводнике возникает дополнительное электрическое поле \mathbf{E}_y . В результате направление результирующего поля \mathbf{E} не совпадает с направлением \mathbf{j} . Оно повернуто на угол φ . Этот угол называется углом Холла.

Эквипотенциальные поверхности, которые ранее проходили перпендикулярно оси x и \mathbf{E}_x (в частности, через электроды a и b), стали перпендикулярными к \mathbf{E} и также повернулись на угол φ (через электроды a_1 и b_1).

$$E_y = \frac{u}{d} = RBj = RB \frac{i}{ad} \quad (1)$$

E_y - величина напряженности, вызванной эффектом Холла; u - напряжение Холла; d - толщина образца; a - ширина образца (вдоль оси z , в направлении магнитного поля); i - ток; R - постоянная Холла.

Знаки угла и постоянной Холла определяются знаком носителей заряда (Рисунок 10).

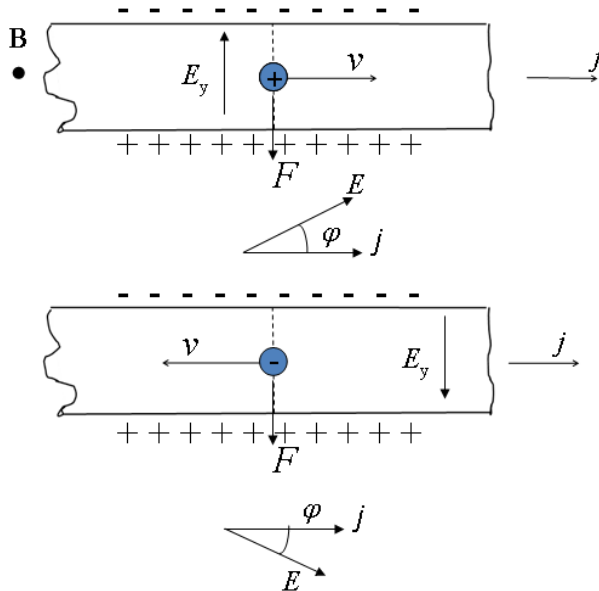


Рисунок 10 – Угол Холла

Например, на верхнем рисунке (рисунок 10) вектор индукции \mathbf{B} направлен от плоскости и носители имеют положительный заряд. Сила Лоренца \mathbf{F} направлена вниз, нижняя грань заряжается положительно. Результирующее электрическое поле \mathbf{E} относительно тока \mathbf{j} направлено против часовой стрелки. Угол Холла φ и постоянную Холла R считают положительными.

Конструкция датчика Холла приведена на рисунке 11.

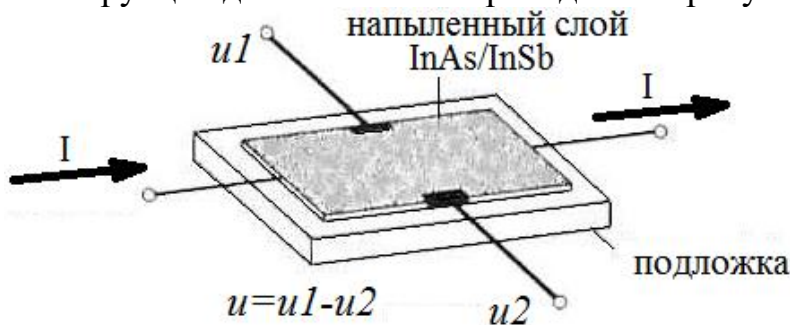


Рисунок 11 - Конструкция датчика Холла

Через полупроводниковый материал идет ток. Если прибор находится в магнитном поле, на каждый отдельный электрон действует сила Лоренца. Электроны смещаются в одном направлении. Это приводит к появлению неоднородности. С одной стороны появляется избыток электронов, с другой - дефицит электронов. Таким образом, между двумя сторонами появляется разность потенциалов u . Эффект Холла используется здесь для измерения

плотности магнитного потока. Если задан ток I , то плотность потока можно рассчитать. Высокую чувствительность к потоку имеют материалы с высокой постоянной Холла. Датчики Холла также применяют для измерения углов, положения, скорости и тока.

2.2. Пример применения датчика Холла. Измерение углов

На основе эффекта Холла могут быть разработаны так называемые поворотные энкодеры. Точное измерение угла может быть достигнуто с помощью кругового расположения четырех или более датчиков (рисунок 12). Ось вращения магнита проходит через центр круга. Неподвижные датчики, обращенные друг к другу, подсоединены попарно к двум дифференциальным усилителям (четыре синусоидальных сигнала, которые по фазе на 90° сдвинуты относительно друг друга).

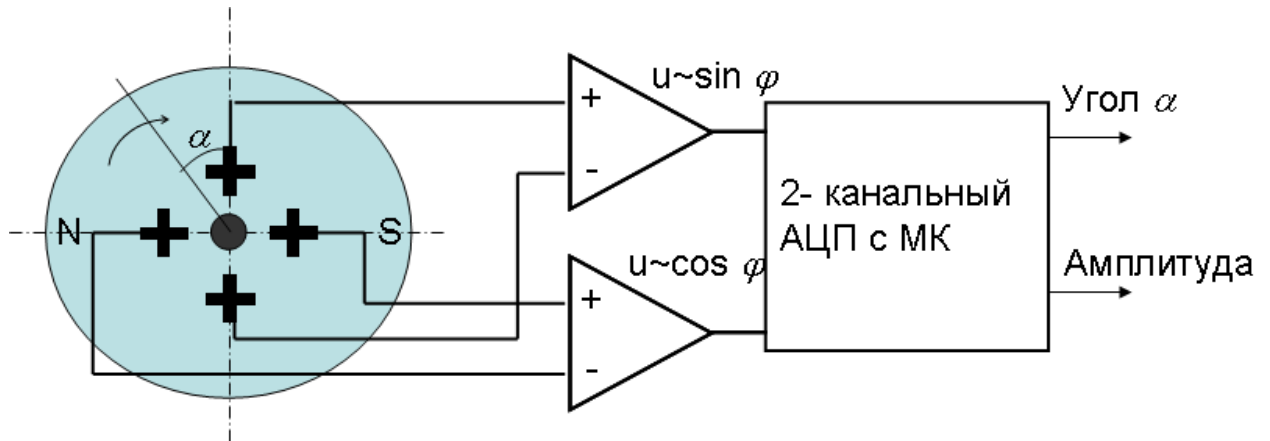


Рисунок 12 - Поворотный энкодер на основе датчиков Холла

Напряжения на выходах датчиков Холла:

$$u_1 = U_{max} \cdot \sin(\varphi), u_2 = U_{max} \cdot \cos(\varphi), u_3 = U_{max} \cdot (-\sin(\varphi)), u_4 = U_{max} \cdot (-\cos(\varphi)).$$

Напряжение на выходе верхнего операционного усилителя (рисунок 17)

$$u_1 + u_3 = 2 \cdot U_{max} \cdot \sin(\varphi) \text{ и на выходе нижнего усилителя } u_2 + u_4 = 2 \cdot U_{max} \cdot \cos(\varphi)$$

Тогда:

$$\alpha = \arctg \frac{2U_{max} \sin(\varphi)}{2U_{max} \cos(\varphi)} = \arctg \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)}.$$

3 ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ГАЗА

3.1. Термоанемометрия

Для измерения величины и направления локальных скоростей газа используют так называемые термоанемометры с подогреваемым проводником на основе зависимости между теплоотдачей от нагретой металлической нити и скоростью набегающего газового потока (рисунок 13).

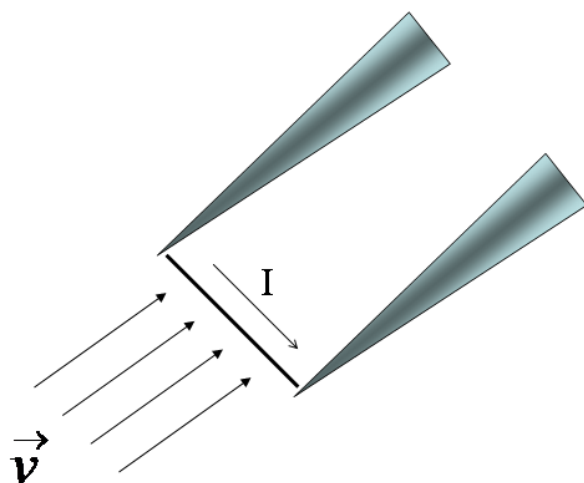


Рисунок 13 - Термоанемометр. V - скорость набегающего потока газа, I – ток через металлическую нить анемометра

В термоанемометрии используется чувствительный элемент, который нагревается электрическим током и электрическое сопротивление которого зависит от температуры. Теплоотдача набегающему потоку газа связана со скоростью этого потока. Измерив электрическое сопротивление, можно перейти к скорости потока. Чувствительные элементы могут быть разными, например это может быть проволока или тонкая пленка. Для работы датчиков необходимо поддерживать (стабилизировать) ток нагрева I и усиливать сигнал от датчика. Свойства датчика и усилителя оказывают существенное влияние на измерительный сигнал, поэтому обычно калибруется полностью вся измерительная цепь. Также следует учитывать, что показания термоанемометра будут меняться при изменении температуры потока, поэтому калибровку следует производить при разных температурах потока.

Термоанемометрия дает возможность определения скорости потока с высокой чувствительностью, что необходимо, например, для следующих исследований:

- переходные эффекты (разделение потока);
- аэроакустические эффекты;
- измерение степени турбулентности.

Недостатком термоанемометрии является искажение набегающего потока датчиком.

Имеется два типа термоанемометров:

- Анемометрия с постоянным током;
- Анемометрия с постоянной температурой.

При анемометрии постоянного тока датчик нагревается постоянным током. Поток изменяет сопротивление датчика и, следовательно, падение напряжения на датчике, которое представляет собой измерительный сигнал.

При анемометрии с постоянной температурой используется схема управления для поддержания постоянной температуры датчика.

Электрическая мощность для нити термоанемометра может быть определена по формуле Кинга:

$$I^2 \cdot R_n = (t_n - t_p) \cdot (A + B \cdot v^{1/2}) \quad (2)$$

t_n - температура нити; t_p - температура потока; A, B - константы, зависящие от граничных условий; v - перпендикулярная составляющая скорости потока.

Таким образом, электрическая мощность $I^2 \cdot R_n$ зависит от разности температур между нитью и потоком, а также от скорости потока и граничных условий соответствующих исполнению.

Температура окружающей среды влияет не только на результат калибровки, но также и на сигнал от нагретой нити. Ошибка зависит от разницы температур между датчиком и потоком. Калибровка при различных температурах и соответствующая коррекция температуры датчика обычно позволяют получить погрешность около 1%. Если нить загрязнена, это препятствует тепловому потоку от нити и ведет к занижению показаний.

4. ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

4.1. Температура

Понятие «температура» вводят как меру равновесия систем, находящихся в тепловом контакте друг с другом. Например, в [1] можно прочесть: «Величина, называемая температурой, определяется таким образом, чтобы две системы, находящиеся в тепловом равновесии друг с другом, имели одно и то же значение этой величины».

Пусть имеется две системы, система 1 и система 2, имеющие число состояний соответственно g_1 и g_2 , число молекул в каждой N_1 и N_2 и энергию U_1 и U_2 в каждой.

Тогда [1]:

$$\left(\frac{\partial \ln g_1}{\partial U_1} \right)_{N_1} = \left(\frac{\partial \ln g_2}{\partial U_2} \right)_{N_2} \quad (3)$$

и две системы имеют одинаковые температуры при выполнении этого условия. Величина $\ln g = S$ есть энтропия. Тогда:

$$\left(\frac{\partial S_1}{\partial U_1} \right)_{N_1} = \left(\frac{\partial S_2}{\partial U_2} \right)_{N_2} \quad \text{и} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{\partial S}{\partial U} \right)_N, \quad (5)$$

где τ - так называемая фундаментальная температура [1], которая связана с действительной через постоянный множитель – постоянную Больцмана k :

$$\tau = kT, \quad (6)$$

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К, T - абсолютная температура, К.

Таким образом, температура не может быть измерена непосредственно. О ней судят по изменению физических свойств тел, например, таких как: объем, давление, электрическое сопротивление, термоЭДС, интенсивность излучения и т.д. Такое свойство, выбранное для измерения температуры тела, называется *термометрическим*. При этом возможно проводить измерения как контактными, так и неконтактными методами. Под неконтактными методами измерений температуры обычно понимают оптические методы измерения температуры по собственному излучению тел. Часто их называют термином *пирометрия* [2]. Однако температуру тела можно измерить не только по излучению в оптическом диапазоне, но и, например, по излучению в радиодиапазоне электромагнитного излучения.

4.2. Температурные шкалы

Температурной шкалой называют «непрерывную совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями какого-либо удобно и достаточно точно измеряемого физического свойства, представляющего собой однозначную и монотонную функцию температуры» [2].

4.2.1. Шкала Фаренгейта

Голландский ученый Фаренгейт ввел свою шкалу в 1714 году. За 0 градусов в шкале Фаренгейта (0°F) принята температура смеси льда и поваренной соли в равных пропорциях. Температура тройной точки воды принята за 32°F , температура человеческого тела за 96°F и температура кипения воды за 212°F . В качестве рабочей жидкости в своем термометре он применил ртуть. Ему впервые удалось организовать производство термометров с воспроизводимыми шкалами.

4.2.2. Шкала Цельсия

Самой употребительной шкалой является шкала Цельсия. Цельсий - шведский ученый, который ввел свою температурную шкалу в 1742 году. За 0°C он принял температуру кипения воды, за 100°C - температуру замерзания воды. В 1750 году его шкалу «обратил» его ученик Стремер [2,3]. В таком виде его шкала используется сегодня, т.е. за 0°C принимается температура тройной точки воды, а за 100°C температура кипения воды. Связь между шкалами Цельсия и Фаренгейта выражается зависимостью: $^{\circ}\text{C} = 5/9(t^{\circ}\text{F} - 32)$.

4.2.3. Эмпирические шкалы

Шкалы Фаренгейта и Цельсия построены на основе физического свойства – теплового расширения тел. Шкалы, построенные на основе какого-либо конкретного физического свойства (изменение объема с изменением температуры, изменение сопротивления с изменением

температуры и т.д.) носят название эмпирических, а физическое свойство u , используемое для построения шкалы, называется **термометрическим свойством**. Точки для построения шкалы выбираются таким образом, чтобы им соответствовали легко воспроизводимые значения температуры, стабильность которых подтверждается физическими соображениями, например температура кипения или затвердевания. Точкам шкалы присваиваются определенные числовые значения и предполагается, что термометрическое свойство u в диапазоне температуры от t_1 до t_2 линейно зависит от температуры t (рисунок 14) [2,3]:

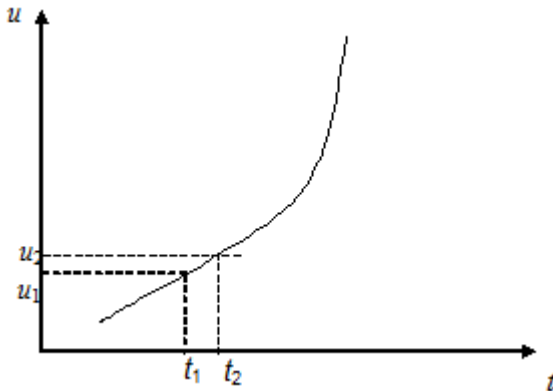


Рисунок 14 - Построение эмпирической шкалы. t - температура, u - термометрическое свойство, $(t_2 - t_1)/(u_2 - u_1)$ – коэффициент пропорциональности между температурой и термометрическим свойством

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{u_2 - u_1} (u - u_1) \quad (7)$$

4,2,4. Термодинамическая шкала температуры

Томсон (лорд Кельвин) в 1848 г. доказал, что существует температура, при которой прекращается тепловое движение. Эту температуру он назвал **абсолютным нулем** температуры. Абсолютный нуль в шкале Цельсия имеет значение $-273,15^\circ\text{C}$. Абсолютный нуль был принят за начало отсчета по температурной шкале Кельвина, которая была положена в основу термодинамической шкалы температуры, для которой за основу берутся объективные термодинамические законы, а не физические свойства тел, поэтому, в отличие от эмпирических шкал, она является объективной, так как не зависит от каких-либо свойств веществ. За размер градуса в этой шкале берется размер градуса Цельсия, и связь между шкалой Цельсия и термодинамической шкалой описывается следующим образом [2,3]:

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (8)$$

Физической основой термодинамической шкалы являются законы термодинамики, в частности, закон, описывающий работу тепловой машины в цикле Карно:

$$\frac{T_2 - T_1}{T_1} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \quad (9)$$

Работа в цикле Карно пропорциональна разности температур и не зависит от термометрического свойства.

В других физических законах температура также является объективной закономерностью, не зависящей от физических свойств каких то веществ.

Например:

$PV = RT$ - в законе Клайперона-Менделеева,

$E d\lambda = c_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right)^{-1} d\lambda$ - в законе Планка, где E – энергия излучения абсолютно черного тела, T – его температура, λ - длина волны, c_1 и c_2 – постоянные Планка, $c_1 = 2\pi c_0^2 h$, $c_2 = \frac{hc_0}{k}$, $c_0 = 2,9976 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме, $h = 6,624 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м², $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К.

$\bar{u}_{ш}^2 = 4kTR\Delta f$ - , в формуле Найквиста для тепловых шумов, $\bar{u}_{ш}^2$ - средний квадрат напряжения шумов на сопротивлении R , Δf - полоса частот, в которой измеряется напряжение шумов.

В приведенных законах отсутствуют физические свойства каких-либо материалов. Поэтому они выражают объективную связь между температурой и другими физическими величинами. Однако в действительности попытка практически реализовать термодинамическую шкалу наталкивается на ряд трудностей. Закон Клайперона-Менделеева для реальных газов дает большую погрешность, закон Планка написан для идеального, так называемого абсолютно черного тела. Излучение реальных тел может сильно отличаться от этой закономерности. Поэтому был принят компромисс между термодинамической шкалой и эмпирическими шкалами, который был реализован как «Международная температурная шкала».

4.2.5. Международная температурная шкала (МТШ)

В этой шкале возможно применение как градуса Цельсия, так и Кельвина, она была принята в 1990 году и получила наименование МТШ-90 (МТШ - международная температурная шкала). Связь между значениями температуры по шкалам Цельсия и МТШ описывается зависимостью:

$$T = t + 273,15$$

МТШ основывается на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым приписаны определенные значения температуры и на эталонных приборах, отградуированных при этих температурах [3].

4.3. Термоэлектрический ряд металлов

Итальянский физик А. Вольта (1745— 1827) установил, что если металлы Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd привести в контакт в

указанной последовательности, то каждый предыдущий при соприкосновении с одним из следующих зарядится положительно. Этот ряд называется рядом Вольта.

4.4. Термоэлектричество

Эффект Зеебека или термоэлектрический эффект - возникновение ЭДС на концах последовательно соединённых проводников из разнородных металлов, контакты между которыми находятся при различных температурах t_1 и t_2 (рисунок 15).

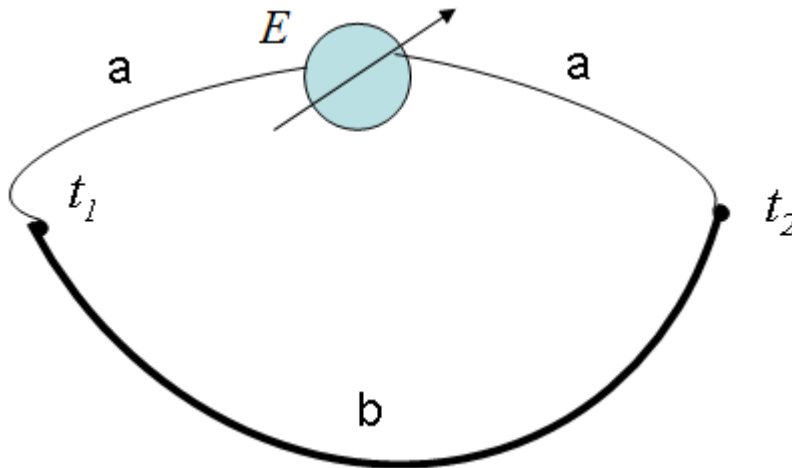


Рисунок 15 - Эффект Зеебека. $E = k(t_2 - t_1)$, k – коэффициент Зеебека, мкВ/К

Эффект, обратный эффекту Зеебека – нагрев или охлаждение спая двух металлов при пропускании через него электрического тока, называется **эффектом Пельтье**.

Пусть имеется замкнутая цепь из двух различных металлов (рисунок 16).

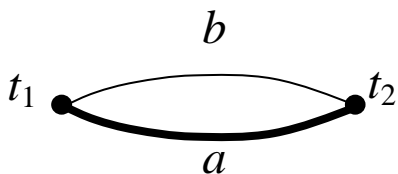


Рисунок 16 - Замкнутая цепь из двух различных металлов

ЭДС в этой цепи: $E_{ab}(t_2, t_1) = e_{ab}(t_2) - e_{ab}(t_1)$. Если $t_1 = t_2$, то $E_{ab}(t_2, t_1) = 0$. Чтобы измерить ЭДС в цепи на рисунке, необходимо разорвать один из спаев и вставить в разрыв измерительный прибор (рисунок 17).

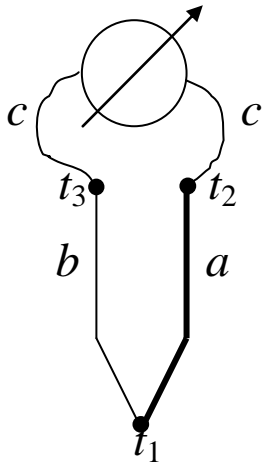


Рисунок 17 - Измерительная цепь из двух различных металлов

На рисунке 17 прибор подсоединен своими проводами, c к термпаре. В общем случае температуры контактов ac и cb – разные, t_2 и t_3 и в цепи появился третий провод – c . Как это скажется на результате измерения? Чтобы понять это, изобразим эквивалентную схему, где измерительный прибор заменен проводником c (рисунок 18),

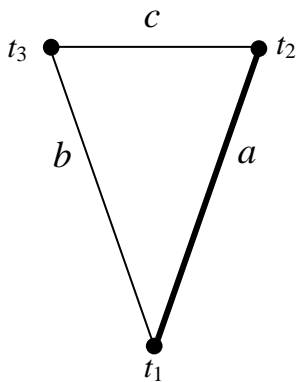


Рисунок 18 – Эквивалентная схема для цепи рисунка 17

$$E = e_{ba}(t_1) + e_{ac}(t_2) + e_{ab}(t_3), \text{ если } t_1 = t_2 = t_3 = t, E = e_{ba}(t_1) + e_{ac}(t_2) + e_{ab}(t_3) = 0, \\ -e_{ab}(t) = -e_{ac}(t) - e_{cb}(t) \text{ и } e_{ab}(t) = e_{ac}(t) + e_{cb}(t).$$

$$\text{Тогда } E = -e_{ac}(t_1) - e_{cb}(t_1) + e_{ac}(t_2) + e_{cb}(t_3) \text{ и } E_{ac}(t_2, t_1) + E_{cb}(t_3, t_1) = E.$$

Если $t_2 = t_3$, то :

$$E_{ac}(t_2, t_1) = E_{cb}(t_2, t_1).$$

Это говорит о том, что при равенстве температур спаев bc и ac , $t_2 = t_3$ наличие третьего проводника c с неизвестными характеристиками не влияет на результат измерения.

Из приведенных выкладок можно сделать выводы:

- 1 Необходимо обеспечивать равенство температур t_2 и t_3 соединения проводов от термпары с измерительным прибором;

2 Чтобы получить результат измерения, необходимо знать температуру t_2 этих точек. Затем найти в справочнике, например [2] значение термоЭДС для этой температуры $E(t_2, t_0)$. Далее она складывается с измеренной величиной $E(t_2, t_1)$, $E(t_2, t_0) = E(t_2, t_0) + E(t_2, t_1)$ и для ЭДС $E(t_2, t_0)$ ищется значение t_2 в градуировочных таблицах [2].

3 Таким образом, при измерениях температуры термопарами всегда необходимо вводить поправку на так называемую температуру холодных спаев, мест соединения проводов от термопары с проводами измерительного прибора.

Существуют специальные усилители для термопар, например, AD594/AD595, фирмы Analog Devices. Представляет собой монолитное устройство с встроенной компенсацией термоЭДС холодных спаев термопары, предназначенное для термопары типа хромель-алюмель, но функционирует также с термопарой типа хромель-копель. Для этих же целей имеются усилители AD597, также Analog Devices и LTK001 (Linear Technology).

Схема включения усилителя AD595 представлена на рисунке 19.

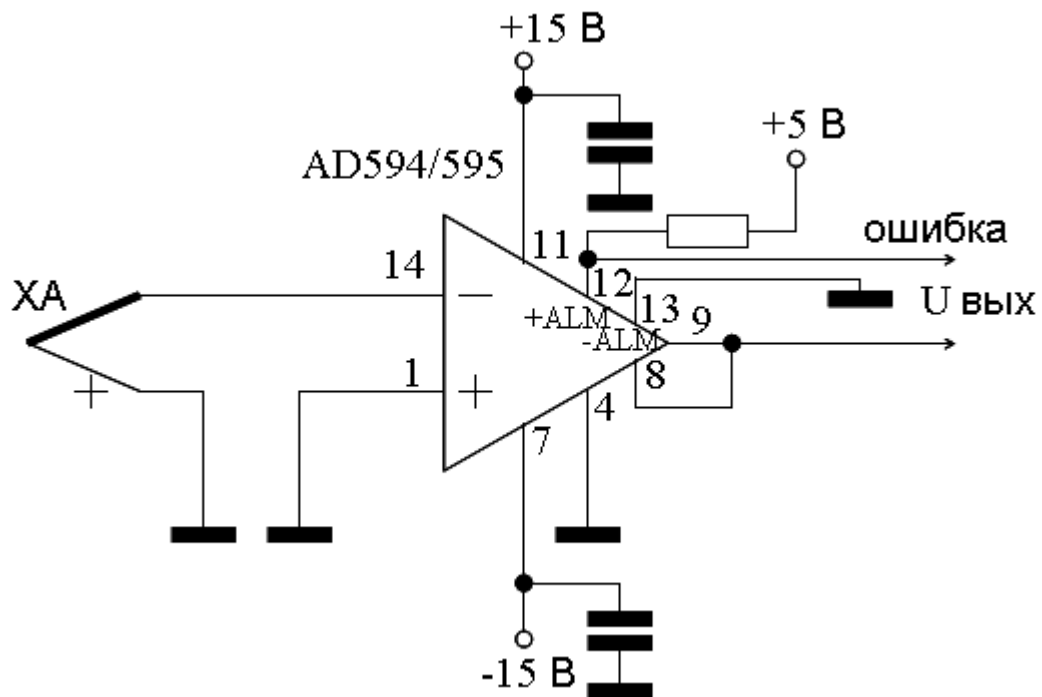


Рисунок 19 - Схема включения усилителя AD595

Для измерения только положительных температур питание осуществляется от однополярного источника напряжения от +5 до +15 вольт, для отрицательных необходим еще такой же источник отрицательного напряжения. При изменении температуры на 1К выходное напряжение изменяется на 10мВ. Имеется сигнализация обрыва термопары (выход с ножки 12 на схеме, «ошибка»)

На следующем рисунке приводится блок-схема усилителя Analog Devices.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

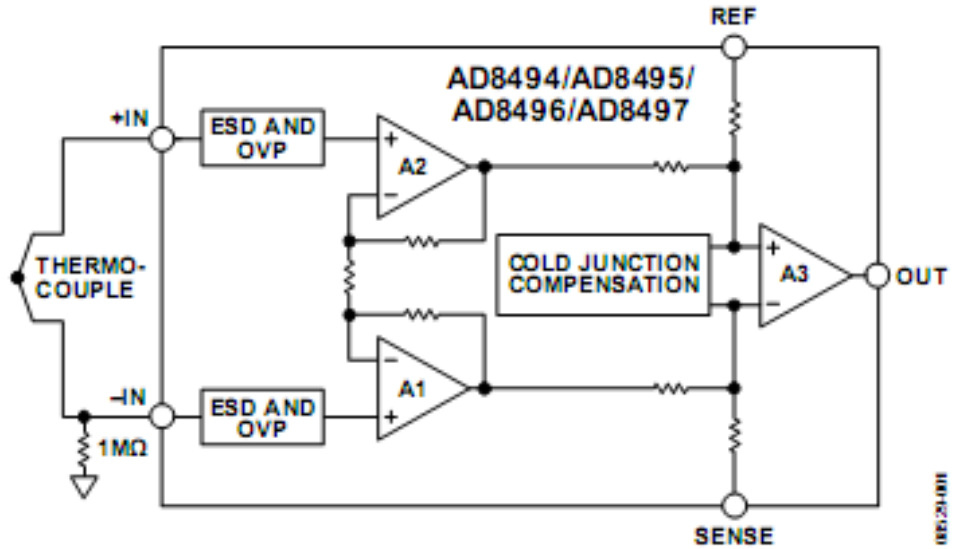


Figure 1.

Рисунок 20 - Блок- схема усилителей для термопар фирмы Analog Devices. Thermocouple – термопара; OVP – защита от повышенного напряжения (overvoltage protection (OVP)); ESD – защита от электростатического разряда (electrostatic discharge (ESD) protection); Cold junction compensation – схема компенсации температуры холодных спаев.

Следующие рисунки (рисунки 21,22) демонстрируют схему соединения усилителей фирмы Analog Devices с термопарами.

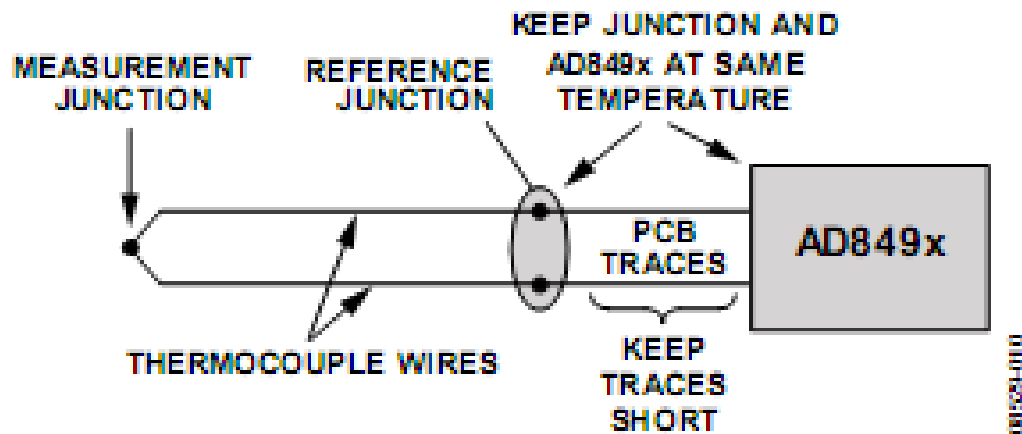


Рисунок 21 - Блок- схема соединения усилителей фирмы Analog Devices с термопарами

Следующая таблица (таблица 1) представляет данные термопар, с которыми могут работать усилители фирмы Analog Devices.

Figure 33 shows an example of a basic connection for the AD849x, with a J type or K type thermocouple input.

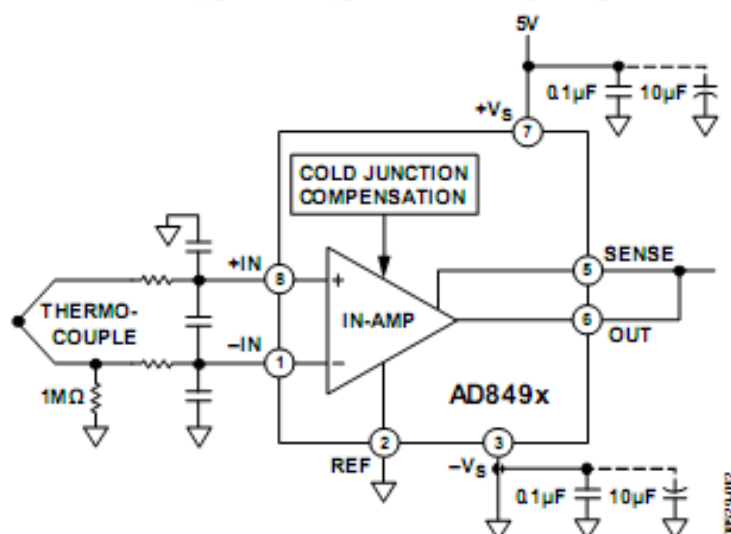


Figure 33. Basic Connection for the AD849x

Рисунок 22 - Принципиальная схема соединения усилителей фирмы Analog Devices с термопарами

Таблица 1.

Тип термопары	НСХ термопары	Положительный электрод	Отрицательный электрод	Диапазон температур, °C	Рабочий диапазон температур, °C
ТХК Тип L	ХК (L)	Хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Копель (56% Cu + 44% Ni)	-200...800	-200...600
ТХА Тип К	ХА (K)	Хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	-200...1300	-200...1000
ТЖК Тип J	ЖК (J)	Железо (Fe)	Константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	-200...900	-200...700
ТПП Тип S	ПП (S)	Сплав платиновой ПР-10 (90% Pt + 10% Rh)	Платина (Pt)	0...1600	0...1300
ТПР	ПР (R)	Сплав платиновой	Платиновой	300...1800	300...1600

Тип В ПР-30 Rh)
(70% Pt + 30% Rh)

4.5. Стандартные термопары

Для температурных измерений применяют стандартные термопары, для которых имеются провода из специальных сплавов (таблица 2, [3]).

Таблица 2

Тип термопары	Буквенное обозначение НСХ*	Материал термоэлектродов		Коэффициент термоЭДС, мкВ/°С (в диапазоне температур, °С)	Диапазон рабочих температур, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
		положительного	отрицательного			
ТЖК	J	Железо (Fe)	Сплав константен (45% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	50-64 (0-800)	от -200 до +750	900
ТХА	K	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав алюмель (94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co)	35-42 (0-1300)	от -200 до +1200	1300
ТМК	T	Медь (Cu)	Сплав константан (55% Си + 45% Ni, Mn, Fe)	40-60 (0-400)	от -200 до +350	400
ТХКн	E	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав константан (55% Cu + 45% Ni, Mn, Fe)	59-81 (0-600)	от -200 до +700	900
ТХК	L	Сплав хромель (90,5% Ni + 9,5% Cr)	Сплав копель (56% Си + 44% Ni)	64-88 (0-600)	от -200 до +600	800
ТНН	N	Сплав никросил (83,49% Ni + 13,7% Cr + 1,2% Si + 0,15%	Сплав нисил (94,98% Ni + 0,02% Cr + 4,2% Si + 0,15% Fe +	26-36 (0-1300)	от -270 до +1300	1300

		Fe + 0,05% C + 0,01% Mg)	0,05% C + 0,05% Mg)			
ТПП1 3	R	Сплав платина- родий (87%Pt + 13%Rh)	платина (Pt)	10-14 (600- 1600)	от 0 до +1300	1600
ТПП1 0	S	Сплав платина- родий (87% Pt — 13% Rh)	платина (Pt)	10-14 (600- 1600)	от 0 до +1300	1600
ТПР	B	Сплав платина- родий (70% Pt — 30% Rh}	Сплав платина-родий (94% Pt-6%Rh)	10-14(1000- 1800)	от 600 до+1700	1800
ТВР	A-1 A-2 A-3	Сплав вольфрам- рений (95% W — 5% Re)	Сплав вольфрам- рений (80% W-20% Re)	14-7 (1300- 2500)	от 0 до +2200 от 0 до +1800 от 0 до +1800	2500
ТСС	I	Сплав силъд	Сплав силин	—	от 0 до + 800	900

4.6. Термометры сопротивления

У этих приборов термометрическим является свойство изменения сопротивления с изменением температуры. Термометры сопротивления получили широкое распространение из-за простоты изготовления и удобства в использовании. Наибольшее распространение получили металлические и полупроводниковые термометры сопротивления.

У металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается. Напротив, у полупроводников происходит падение сопротивления с ростом температуры.

4.6.1. Металлические термометры сопротивления

У чистых металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается (рисунок 23), и зависимость сопротивления от температуры - монотонная. Для довольно значительного диапазона температур можно считать эту зависимость линейной. Ее принято характеризовать с помощью так называемого температурного коэффициента сопротивления (ТКС) α , который определяется выражением:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}. \quad (10)$$

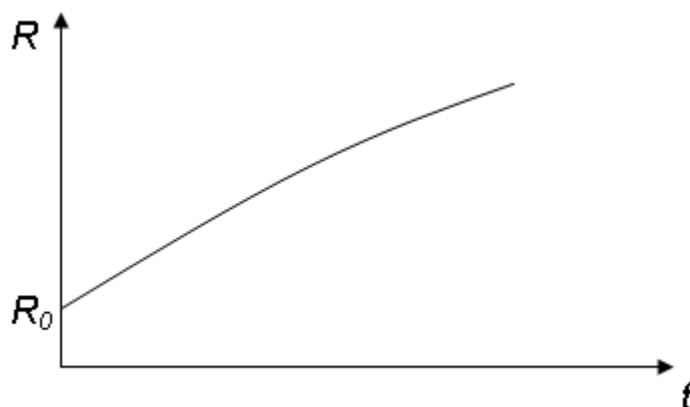


Рисунок 23 - Рост сопротивления чистого металла с ростом температуры

Если принять, что зависимость сопротивления от температуры линейна, что выполняется для чистых металлов в узком диапазоне температур, ее можно выразить формулой:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (11)$$

где α – ТКС, R_0 – сопротивление при температуре 0°C , R_t – сопротивление при температуре t .

Для чистых металлов коэффициент α определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100}, \quad \text{где } R_{100} \text{ – сопротивление металла при температуре}$$

100°C .

Значения ТКС для некоторых металлов: для платины $\alpha = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, для меди $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ и для никеля $\alpha = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Платиновый термометр сопротивления используют в диапазоне температур от -200°C до $+650^\circ\text{C}$.

Медный термометр сопротивления используют в диапазоне температур от -200°C до $+200^\circ\text{C}$. Подробнее о металлических термометрах сопротивления см. в [2].

4.6.2. Полупроводниковые термометры сопротивления

Для изготовления термометров сопротивления широко применяются полупроводниковые материалы, основным достоинством которых является высокая чувствительность к температуре, основными недостатками – нелинейная характеристика и плохая воспроизводимость. Имеются термометры сопротивления из различных полупроводников. Например, для так называемых криогенных температур (от температуры $0,07\text{K}$ до точки кипения азота), удобно применять угольные термометры сопротивления, которые в этом диапазоне имеют высокую чувствительность к изменению температуры. Характерной для полупроводников является падение сопротивления с ростом температуры (рисунок 24).

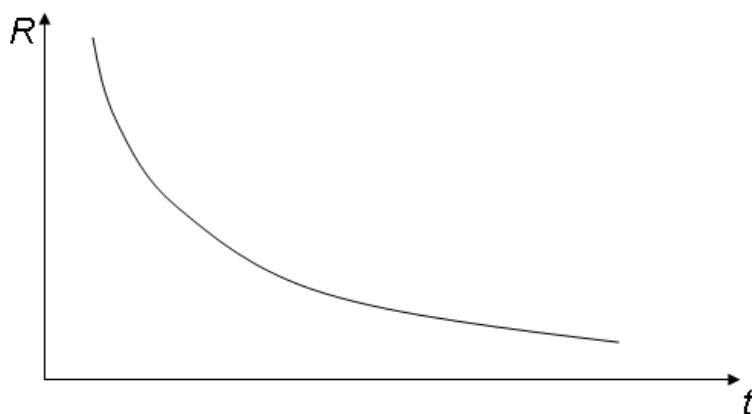


Рисунок 24 – Типичная зависимость сопротивления от температуры для полупроводника

Эту зависимость можно описать выражением:

$$R_t = Ae^{\frac{B}{T}} . \quad (12)$$

4.6.3. Схемы включения термометров сопротивления в измерительную схему. Потенциометрическая схема. Мостовая схема

Для того, чтобы измерить сопротивление, через него надо пропустить ток. Для включения термометров сопротивления в измерительную схему применяют разные электрические схемы, которые можно свести в две группы – потенциометрические схемы и мостовые схемы.

Если включить резистор в цепь источника тока I (рис. 9) и обеспечить условие неизменности этого тока $I = \text{const}$ при изменении сопротивления (например, из-за изменения температуры), то мы получим **потенциометрическую схему**. Тогда падение напряжения на сопротивлении R_t есть однозначная функция температуры (рисунок 25).

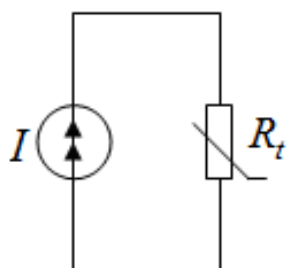


Рисунок 25 - Потенциометрическая схема

На практике применяют так называемую четырехпроводную схему включения термометра сопротивления (рисунок 26), которая также является потенциометрической и от схемы рисунка 25 отличается тем, что термометр имеет четыре провода. Два из них, по которым идет ток от источника напряжения E , называются токовыми (i на рисунке 26), а два, к которым

подключается прибор для измерения напряжения – потенциальными (и на рисунок 26).

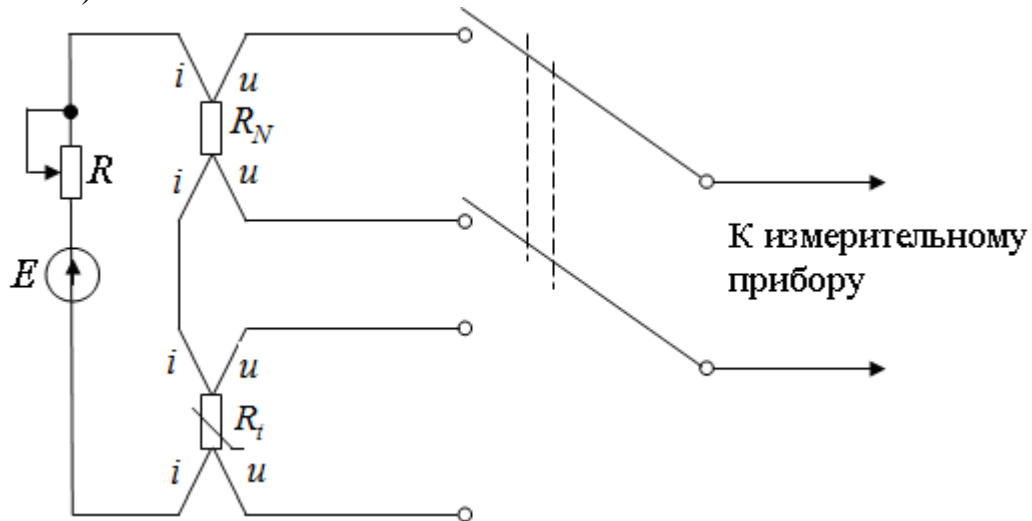


Рисунок 26 - Четырехпроводная схема с образцовым резистором R_N . i – токовые провода, u – потенциальные.

Процесс измерения для схемы на рисунке 26 состоит из двух этапов:

1. Измеряется падение напряжения u_{R_N} на резисторе R_N и по результатам этого измерения определяется ток через последовательно

соединенные резисторы R_N и R_t . $I = \frac{u_{R_N}}{R_N}$;

2. Определяется сопротивление термометра R_t через измерение падения напряжения u_{R_t} на нем $R_t = \frac{u_{R_t}}{I} = R_N \frac{u_{R_t}}{u_{R_N}}$.

Указанные выводы действительны только для того случая, когда прибор, измеряющий падения напряжения u_{R_N} и u_{R_t} имеет большое входное сопротивление: $R_{вх} \gg R_t$, $R_{вх} \gg R_N$. Достоинством такого метода измерения является то, что нет необходимости в точном и стабильном источнике тока, так как ток измеряется перед каждым измерением сопротивления путем измерения падения напряжения u_{R_N} на образцовом резисторе R_N . Рассмотренный метод применяют при многоканальных измерениях температуры с применением термометров сопротивления (рисунок 27).

Сопротивление R_0 термометра сопротивления не равно нулю при температуре 0°C . Поэтому падение напряжения u_{R_t} при 0°C также не равно нулю. Поэтому часто применяют мостовую схему измерения, где можно задать любую начальную точку шкалы. Рассмотрим ее принцип действия.

Начнем рассмотрение с анализа работы делителя напряжения (рисунок 28).

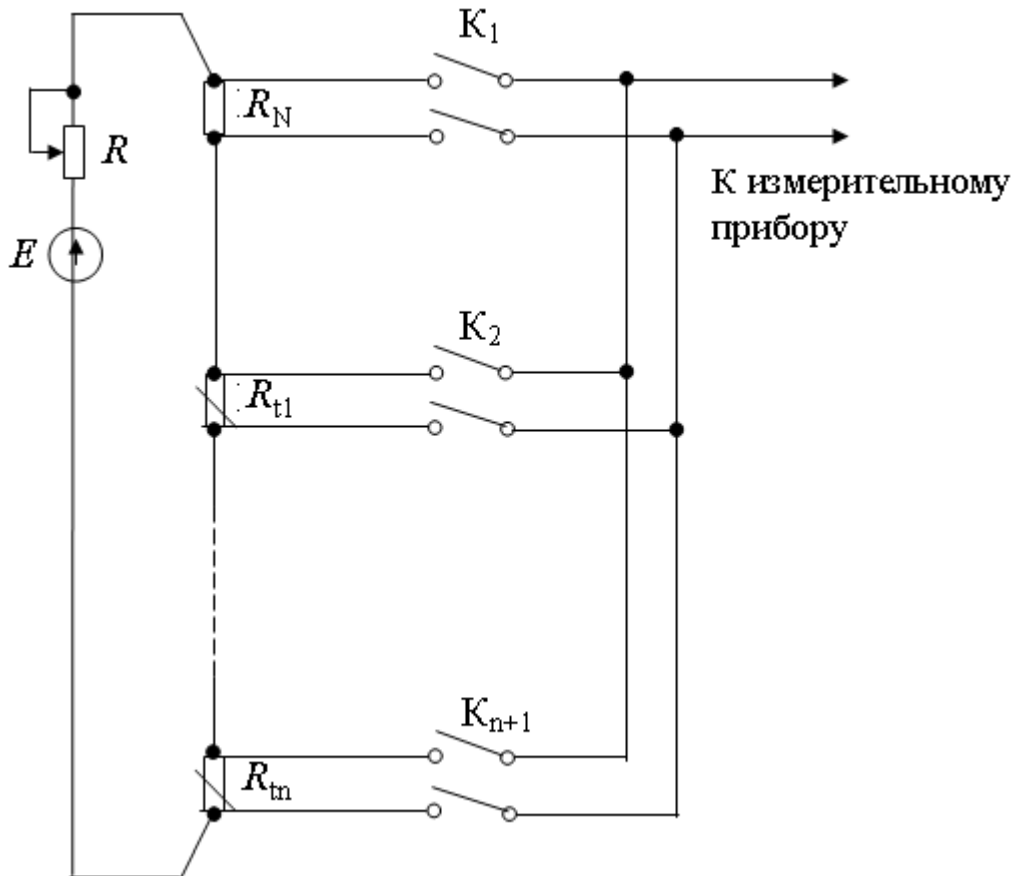


Рисунок 27 - Многоканальные измерения с применением образцового резистора

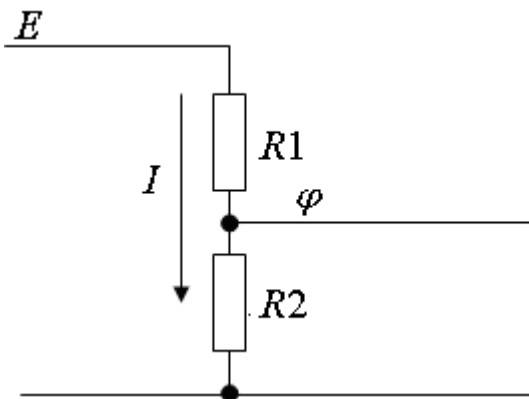


Рисунок 28 - Делитель напряжения

При постоянстве ЭДС E потенциал φ определяется соотношением:

$$\varphi = E \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

В этом соотношении ток в цепи $I = \frac{E}{R_1 + R_2}$.

Если объединить два делителя напряжения в одну схему, то получим схему, представленную на рисунке 29.

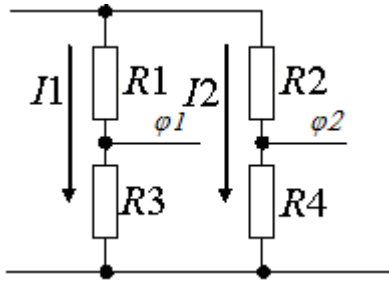


Рисунок 29 - Объединение двух делителей напряжения в одну схему

$$\varphi_1 = E \frac{R_3}{R_1 + R_3} \text{ и } \varphi_2 = E \frac{R_4}{R_2 + R_4}. \text{ Тогда, если } \varphi_1 = \varphi_2, \text{ то } \frac{R_3}{R_1 + R_3} = \frac{R_4}{R_2 + R_4}.$$

Если выполняются условия $R_1 \gg R_3$ и $R_2 \gg R_4$, то : $\frac{R_3}{R_1} \approx \frac{R_4}{R_2}$

Пусть вместо резистора R_4 в схему включен термометр сопротивления, а резистор R_3 - переменный (рисунок 30). Если $R_1 > R_3$ и $R_2 > R_4$, то $\frac{R_3}{R_1} \approx \frac{R_t}{R_2}$ и, из этого выражения получается зависимость сопротивления R_t от других сопротивлений схемы:

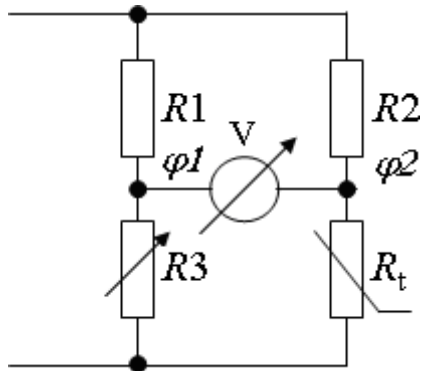


Рисунок 30 – Мостовая схема

$$R_t \approx R_3 \frac{R_2}{R_1}. \quad (*)$$

Мостовую схему обычно изображают в виде рисунка 31.

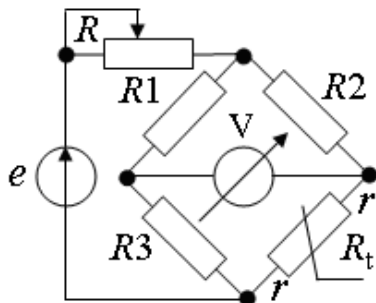


Рисунок 31 - Измерительный мост с термометром сопротивления

Рассмотренные схемы называют измерительными мостами.

Для схемы на рисунке 31 из-за того, что соединительные провода термометра сопротивления обладают конечным сопротивлением (r на рисунке 31) формула (*) примет вид:

$$R_t + 2r \approx R3 \frac{R2}{R1}. \quad (13)$$

Если сопротивление соединительных проводов $2r$ мало по сравнению с сопротивлением термометра R_t , то его можно не принимать во внимание. Если же провода нужно тянуть на большое расстояние от места измерения, то их сопротивлением пренебрегать не следует и для уменьшения их влияния пользуются трехпроводной схемой (рисунок 32):

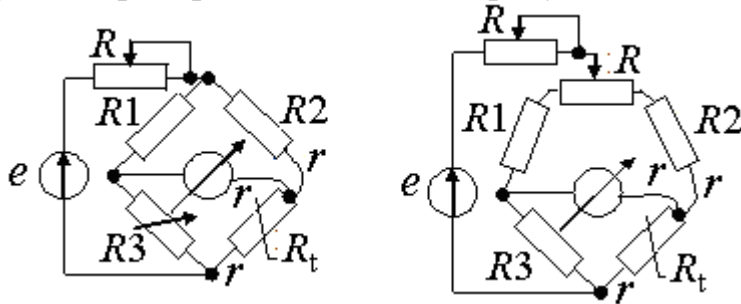


Рисунок 32 - Измерительные мосты с трехпроводной схемой подключения термометра сопротивления

Для схем рисунка 32 один из подводящих проводов r включен в цепь $R2$, еще один в цепь термометра сопротивления, и третий, в цепь измерительного прибора. Тогда формула (13) записывается в виде:

$$R_t + r \approx \frac{R3}{R1} (R2 + r) \quad (14)$$

и при $R3=R1$ происходит полная компенсация влияния подводящих проводов, в остальных случаях - частичная.

Правая схема на рисунке 32 уравнивается перераспределением сопротивления резистора R между плечами моста. Это сделано для исключения влияния переходного сопротивления движка потенциометра $R3$ на левой схеме на результат измерения, так как его сопротивление контролировать невозможно. На правой схеме правая часть потенциометра входит в цепь резистора $R2$ и левая, в цепь резистора $R1$. Тогда играет роль только их соотношение, сопротивление контакта на потенциометре R не влияет на результат измерения.

Термометр сопротивления всегда будет разогреваться текущим через него измерительным током. Этот разогрев приведет к изменению его сопротивления точно так же, как и от изменения сопротивления из-за изменения температуры среды. Поэтому такое изменение сопротивления является погрешностью, и необходимо задать такой ток через термометр, который не приведет к выходу погрешности измерения за рамки допустимого значения. Можно рассмотреть следующий пример задания измерительного тока.

Пусть допустимая погрешность измерения температуры воздуха составляет величину 0,1 К и температура воздуха $t_c=20^\circ\text{C}$. Пусть термометр сопротивления представляет собой цилиндр диаметром 5 мм и длиной 2 см с сопротивлением $R_0=100$ Ом при температуре $t_m=0^\circ\text{C}$, находящийся в спокойном воздухе. Измерительный ток, протекающий через термометр, вызывает выделение в нем мощности $P=I^2 R_t$. Эта мощность вызывает конвективную теплоотдачу от термометра к воздуху по закону $P=\alpha(t_m-t_c)S$. На основании закона сохранения энергии $I^2 R_t=\alpha(t_m-t_c)S$, где α – коэффициент теплоотдачи от термометра в среду, S – площадь боковой поверхности термометра.. Тогда $I=\sqrt{\frac{\alpha(t_m-t_c)S}{R_t}}$, где $t_m-t_c=0,1\text{К}$ -

погрешность измерения температуры. Пусть $\alpha=2\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$, термометр сопротивления- медный, тогда его сопротивление при температуре 20°C $R_t=108$ Ом,

$$S = \pi dl + 2\pi d^2/4 = \pi d(l+d/2) = 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3}/2) = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4}}{108}} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ А}$$

При заданных условиях ток через термометр сопротивления должен иметь величину 0,8 мА.

4.7. Законы излучения

Согласно Планку, интенсивность излучения абсолютно черного тела (АЧТ) $\overset{\circ}{E}_{\lambda,T}$, с абсолютной температурой T в интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta \lambda$ имеет вид:

$$\overset{\circ}{E}_{\lambda,T} d\lambda = c_1 \lambda^{-5} \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda, \quad (15)$$

c_1, c_2 - постоянные Планка, $c_1 = 2\pi^5 c_0^2 h / 15$, $c_2 = hc_0/k$, $c_0 = 2,9976 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$, $k = 1,3805 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$, $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-34} \text{ Вт/м}^2$, $c_2 = 1,438786 \text{ м}\cdot\text{К}$.

Интенсивность излучения АЧТ, ее спектральный характер не зависят от физической природы тела.

Графически распределение интенсивности по длине волны, в зависимости от температуры, изображается в виде так называемых изотерм Планка (рисунки 33,34).

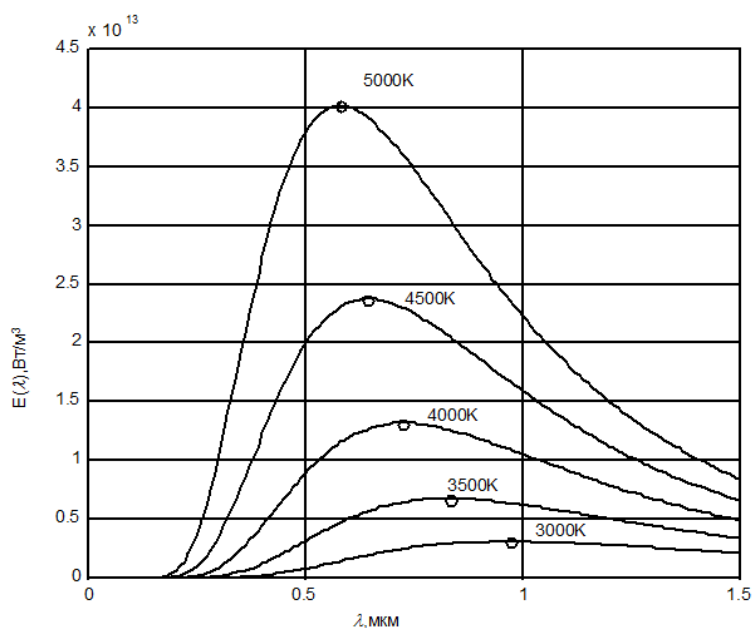


Рисунок 33 - Изотермы Планка для температур от 3000К до 5000К

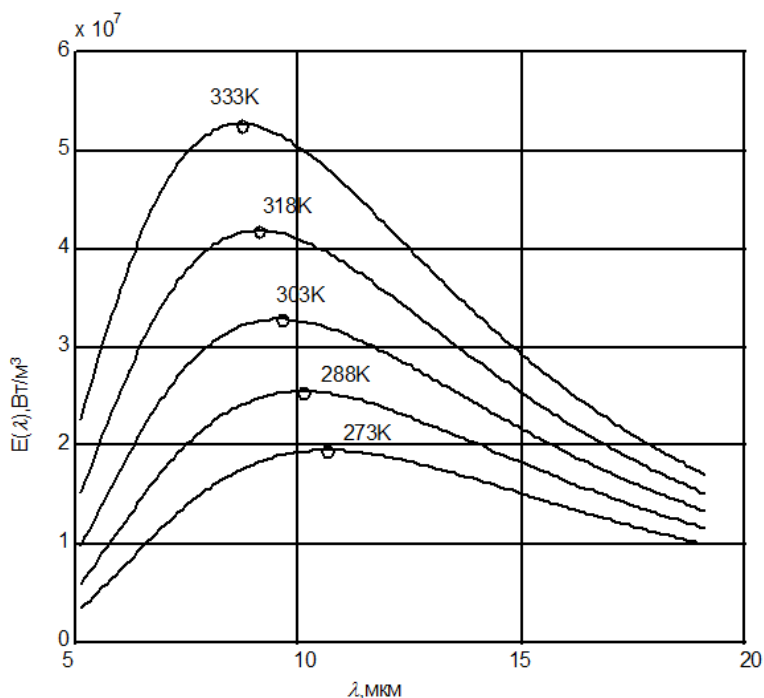


Рисунок 34 - - Изотермы Планка для температур от 273К до 333К

С ростом температуры происходит смещение максимумов кривых в сторону коротких волн. Так проявляется **закон смещения Вина**.

Согласно этому закону, произведение температуры АЧТ T на длину волны λ_{\max} , отвечающей максимальному значению спектральной интенсивности излучения при данной температуре, не зависит от величины температуры и для всех температур является постоянной величиной:

$$T\lambda_{\max} = \frac{c_2}{\alpha} = A = \text{const}, \quad (16)$$

$$a=4,965; A=2896 \text{ мкм}\cdot\text{К}.$$

Плотность излучения по закону Планка принято представлять как функцию длины волны:

$$\overset{\circ}{E}_{\lambda,T} = c_1 \lambda^{-5} \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (17)$$

Приближением закона Планка является **закон излучения Вина**,

$$\overset{\circ}{E}_{\lambda,T} = c_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (18)$$

который получается из закона Планка при выполнении условия:

$$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \gg 1$$

Разница между значениями распределения интенсивности излучения АЧТ по длине волны при различной температуре, вычисленными для диапазонов температур 3000К...5000К (рисунок 35, слева) и 273К...333К (рисунок 35, справа) по закону Планка (сплошная кривая) и Вина (штрихованная кривая).

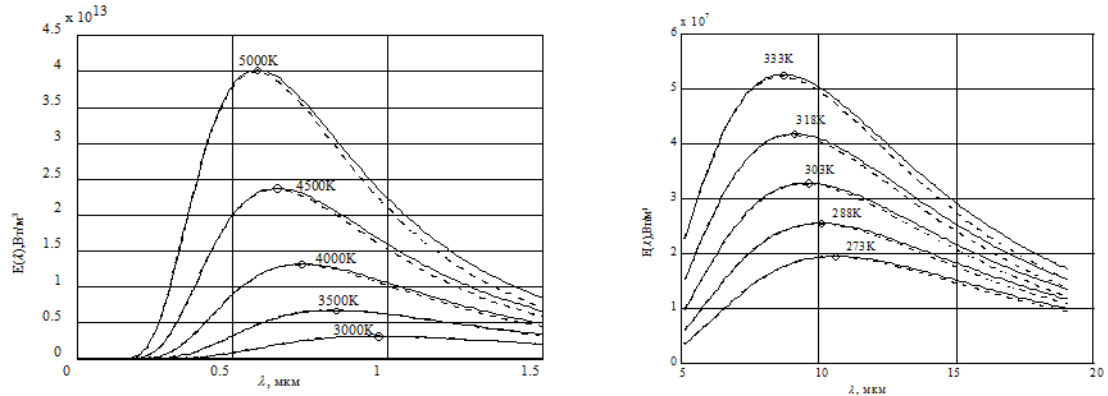


Рисунок 35 - Разница между значениями распределения интенсивности излучения АЧТ по законам Планка и Вина

При выполнении условия $\frac{\lambda T}{c_2} \gg 1$ закон Планка может применяться в

виде приближения, которое носит название **уравнение Рэля-Джинса**:

$$\overset{\circ}{E}_{\lambda,T} = \frac{c_1}{c_2} \lambda^{-4} T \quad (19)$$

4.8. Применение законов излучения для измерений температур [2]

Из-за того, что излучение реальных тел отличается от излучения идеального, абсолютно черного, тела (АЧТ), температуры, измеряемые с применением законов излучения, называют условными. Применяют измерения на одной длине волны, на двух и более длинах волн и в широком диапазоне длин волн. Соответствующие условные температуры называются яркостной, цветовой или спектрального отношения и радиационной.

4.8.1. Яркость температура

Яркостью температурой абсолютно черного тела называется такая температура, при которой абсолютно черное и нечерное тела имеют одинаковую яркость в лучах излучения с длиной волны λ [2].

$$E_{\lambda, T_{\text{я}}}^{\circ} = E_{\lambda, T}, \quad (20)$$

где $E_{\lambda, T_{\text{я}}}^{\circ}$ - энергия излучения АЧТ с температурой $T_{\text{я}}$ на длине волны λ ,
 $E_{\lambda, T}$ - энергия излучения реального тела с температурой T на длине волны λ .
 Далее перепишем (20) с использованием закона Вина:

$$\exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_{\text{я}}}\right) = \varepsilon_{\lambda, T} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad \varepsilon_{\lambda, T} - \text{коэффициент черноты реального тела.}$$

Выполним ряд преобразований:

$$\begin{aligned} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda, T}} - \frac{c_2}{\lambda T_{\text{я}}} &= \frac{c_2}{\lambda T}, \\ \frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{1}{T} &= \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda, T}}, \end{aligned} \quad (21)$$

Последнее выражение (21) выражает связь между действительной и яркостью температурами. Так как $0 < \varepsilon_{\lambda, T} \leq 1$, то $\frac{1}{T_{\text{я}}} - \frac{1}{T} > 0$ или $T > T_{\text{я}}$.

4.8.2. Цветовая температура (температура спектрального отношения)

Цветовой температурой или температурой спектрального отношения, называется такая, при которой черное и нечерное тела в наблюдаемой области спектра излучения имеют одинаковое распределение интенсивности.

$$\frac{E_{\lambda_1, T_{\text{ц}}}^{\circ}}{E_{\lambda_2, T_{\text{ц}}}^{\circ}} = \frac{\varepsilon_1 E_{\lambda_1, T}}{\varepsilon_2 E_{\lambda_2, T}}, \quad (22)$$

λ_1, λ_2 - длины волн, на которых производится измерение и $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - соответствующие коэффициенты черноты. Распишем это выражение,

воспользовавшись законом Вина:
$$\frac{c_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T_{\text{ц}}}\right)}{c_1 \lambda_2^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T_{\text{ц}}}\right)} = \frac{\varepsilon_1 c_1 \lambda_1^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)}{\varepsilon_2 c_1 \lambda_2^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda_2 T}\right)}$$
 и

выполним ряд преобразований:
$$\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T_{\text{ц}}} - \frac{c_2}{\lambda_1 T_{\text{ц}}}\right) = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_2 T} - \frac{c_2}{\lambda_1 T}\right)$$
 и

$$\frac{c_2}{T_{\text{ц}}} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{c_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right).$$

Отсюда:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\dots}} = \frac{\ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}{-2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \quad (23)$$

Выводы из полученного выражения (23):

1. Если $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) > 0$, $T_{Ц} > T$ - это действительно для многих металлов;

2. Если $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) < 0$, $T_{Ц} < T$ - неметаллические тела;

3. Если $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, $\ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2) = 0$, $T_{Ц} = T$.

Пункт 3 выводов означает, что если известно, что коэффициент черноты ε в используемом в измерениях спектральном диапазоне постоянен ($\varepsilon = const$), результат измерения представляет собой истинную температуру T .

4.8.3. Радиационная температура

Радиационной называется такая температура T_p абсолютно черного тела при которой энергии черного и нечерного тел во всем диапазоне длин волн равны между собой.

$$\varepsilon_{\Sigma} \sigma T^4 = \sigma T_p^4, \quad (24)$$

ε_{Σ} - интегральный коэффициент черноты, T_p - радиационная температура. Тогда связь между действительной и радиационной температурой имеет вид:

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_{\Sigma}}}. \quad (25)$$

Закон Стефана-Больцмана рассматривает область длин волн от 0 до ∞ и последнее выражение (25) выведено для этого случая. Однако, реальные устройства возможностью принимать излучение в диапазоне волн от 0 до ∞ не обладают (рисунок 36) и применяемые приемники оптического излучения функционируют в ограниченном диапазоне длин волн. Поэтому в реальности вместо закона Стефана-Больцмана прибор реализует закон вида:

$$E_{\lambda, T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v_{\lambda} S_{\lambda} \varepsilon_{\lambda, T} c_1 \lambda^{-5} \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right)^{-1} d\lambda, \quad (26)$$

Где v_{λ} - спектральная характеристика оптической системы, S_{λ} - спектральная характеристика приемника излучения.

Спектральные характеристики приемников излучения из [4] приведены на рисунке 36.

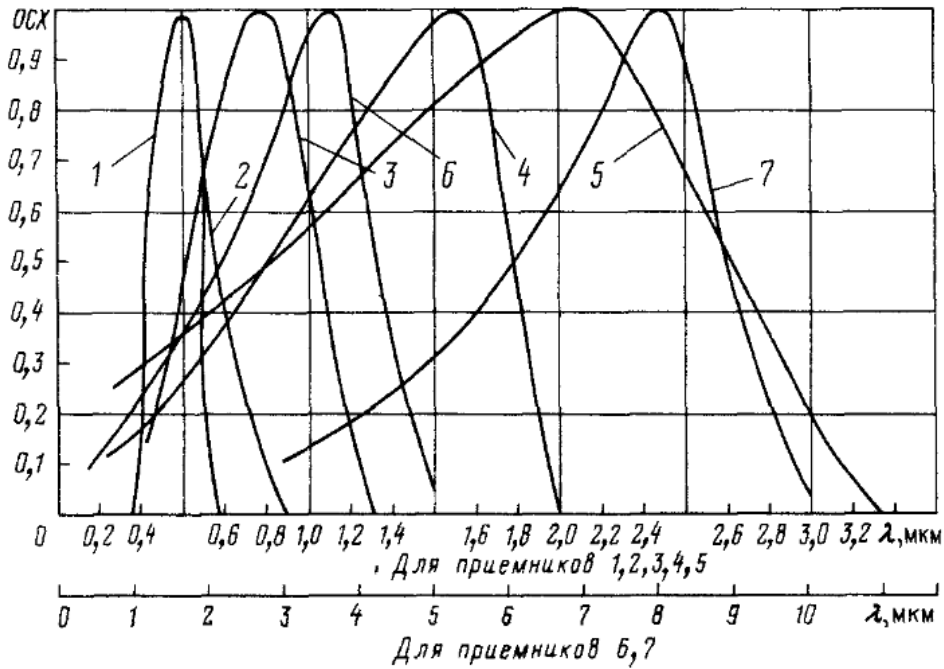


Рисунок 36 - Спектральные чувствительности приемников излучения. OSX- относительная спектральная характеристика. 1 – фотоэлемент СЦВ-6, 2 – фотоэлемент Ф-9, 3 – кремниевый приемник, 4 – германиевый приемник, 5 – фоторезистор PbS, 6 – фоторезистор TeS, 7 – фоторезистор InSb (<https://studfile.net/preview/1427504/page:24/>) .

5. ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ

Давление можно определить на основе системы «цилиндр-поршень» (рисунок 37). Если на поршень с газом с площадью основания S действует сила F , то давление определяют как

$$p = \frac{F}{S}, \quad (27)$$

$\text{Н/м}^2 = \text{Па}$, где F - сила, S – площадь.

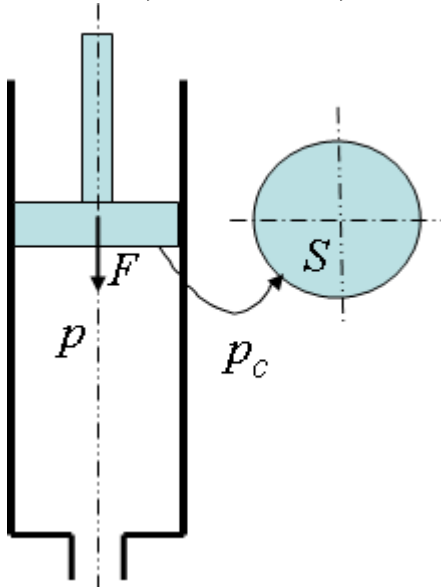


Рисунок 37 – Давление

Кроме единицы системы СИ, паскаль, Па, применяют следующие единицы измерения давления:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 1000 \text{ мбар};$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ Торр} = 760 \text{ мм Нг} = 10,33 \text{ м Н}_2\text{О} = 1,013 \text{ бар} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

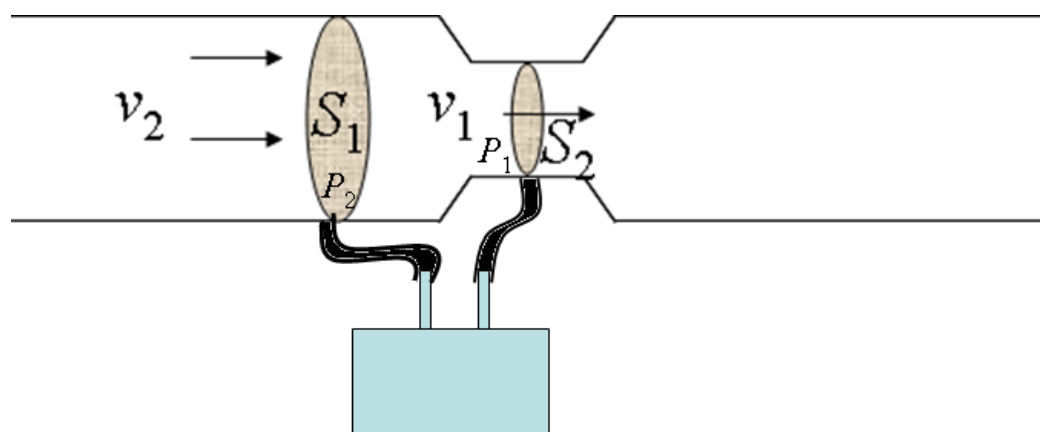
$$1 \text{ Торр} = 1 \text{ мм Нг} = 133,322 \text{ Па}.$$

Некоторые производители для датчика давления приводят его диапазон, обозначенный в единицах psi (*pound-force per square inch*, lbf/in², фунт на квадратный дюйм). Это внесистемная, американская единица давления. 1 psi = 6894,75729 Па.

5.1. Абсолютное, относительное (избыточное) и дифференциальное давление

Рассматривают абсолютное, относительное (избыточное) и дифференциальное давление. В приведенном примере можно измерить давление в цилиндре относительно давления окружающей среды, тогда мы получим относительное давление $\Delta p = p - p_c$. На следующих рисунках приведен пример измерения дифференциального давления в трубе с сужением $\Delta p = p_1 - p_2$ (рисунок 38) и внешний вид датчика дифференциального давления (рисунок 39) и абсолютного давления (рисунок 40).

Если же датчик устроен так, что он делает измерение относительно давления в вакууме и с его помощью измеряется давление в цилиндре p (рисунок 37), то это будет абсолютное давление.



Дифференциальный датчик давления

Рисунок 38 - Измерение дифференциального давления $\Delta p = p_1 - p_2$ в трубе с сужением (подробнее будет рассмотрено в разделе б)



Рисунок 39 - Датчик для измерения дифференциального давления (<https://www.chipdip.ru/catalog-show/pressure-sensors>)



Рисунок 40 - Датчик для измерения абсолютного давления (<https://www.chipdip.ru/catalog-show/pressure-sensors>)

5.2. Методы измерения давления и типы датчиков их реализующие

Для измерений давления применяют датчики следующих типов:

1. Тензометрические датчики;
2. Емкостные датчики;
3. Пьезоэлектрические датчики;
4. Кремниевые датчики на основе пьезорезистивного эффекта.

Далее будут рассмотрены емкостные датчики и датчики на основе пьезорезистивного эффекта.

5.2.1. Емкостные датчики давления

Емкостный датчик давления представляет собой конденсатор с жесткой пластиной и гибкой мембраной в качестве обкладок (рисунок 41, [6]). Емкость пропорциональна расстоянию между обкладками. Измеряемое давление прикладывается со стороны гибкой мембраны, и возникает изгиб и изменение емкости, которое далее измеряется с помощью электрической схемы.

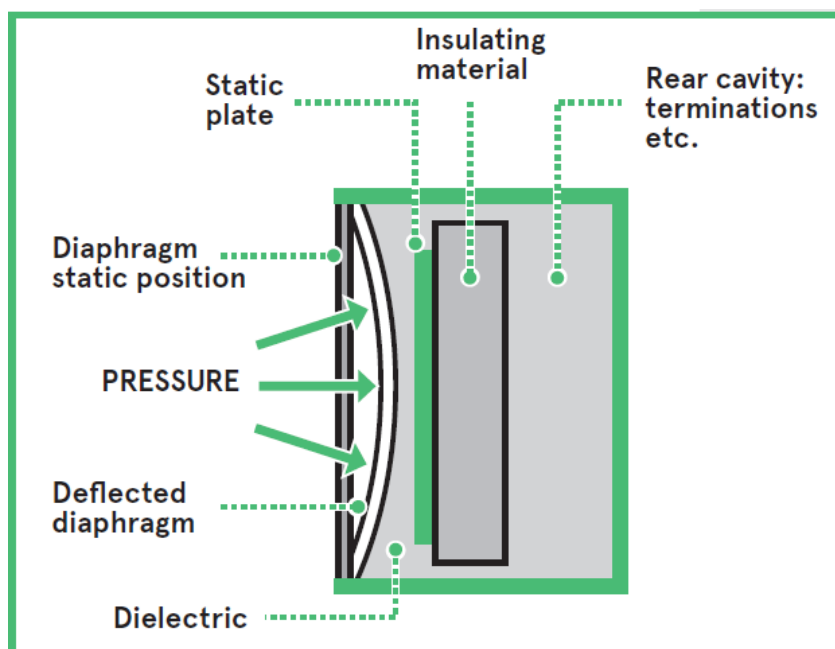


Рисунок 41 - Емкостный датчик давления. Diaphragm static position – исходное положение диафрагмы; PRESSURE – приложенное давление; Deflected diaphragm – прогнувшееся диафрагма; Dielectric – диэлектрик; Static plate – неподвижная обкладка; Insulating material – мзольатор; Rear cavity: terminations etc. ; полость, выводы и т.д.

5.2.2. Датчики на основе пьезорезистивного эффекта

Пьезорезистивный эффект проявляется в том, что при приложении к полупроводниковой (кремниевой) пластине механического напряжения, вызванного, например, подачей давления на датчик (рисунок 42), происходит изменение ее электрического сопротивления. Датчики на этом эффекте получили самое большое распространение.

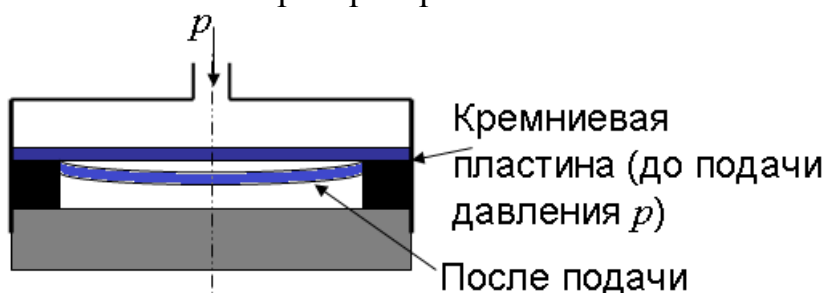


Рисунок 42 - Датчик давления на пьезорезистивном эффекте

Пьезорезистивные датчики являются одними из наиболее распространенных типов датчиков давления, в них используется изменение электрического сопротивления материала при его растяжении для измерения давления. Эти датчики используются для измерения как абсолютного, так и относительного или дифференциального давления в широком диапазоне давлений от единиц до тысяч бар. Еще одним преимуществом таких датчиков является использование кремния для их изготовления. Как говорилось выше, принципом работы пьезорезистивного датчика

давления является изменение электрического сопротивления при растяжении. Это происходит по разным причинам, в числе которых:

- сопротивление проводника пропорционально его длине, поэтому растяжение увеличивает сопротивление;
- площадь поперечного сечения проводника падает при его растяжении, что также приводит к увеличению сопротивления;
- удельное сопротивление некоторых материалов увеличивается при растяжении.

Последняя из этих причин и есть пьезорезистивный эффект, который обусловлен деформациями кристаллической решетки и сильно различается между материалами. Этот эффект очень сильно проявляется в полупроводниках. Чувствительность к деформации α_Δ определяется, как относительное изменение сопротивления, деленное на деформацию:

$$\alpha_\Delta = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}, \quad (28)$$

$\varepsilon = \Delta L / L$ - деформация, определяется как относительное изменение длины L .

Коэффициент α_Δ у полупроводников существенно выше, чем у металлов. Его величина у кремния $\alpha_\Delta = 135$, у металлов $\alpha_\Delta < 10$.

Обычно в кремнии формируют четыре тензометрических датчика, которые соединяют в мостовую схему (рисунок).

Рисунок 43 из [6] показывает, как чувствительные элементы датчика давления мостового типа крепятся к гибкой диафрагме, так что сопротивление изменяется в соответствии с величиной отклонения диафрагмы. Общая линейность датчика зависит от стабильности диафрагмы в указанном диапазоне измерений, а также от линейности пьезорезистивных элементов.

На рисунке 44 представлена мостовая схема включения пьезорезистивных датчиков [6]

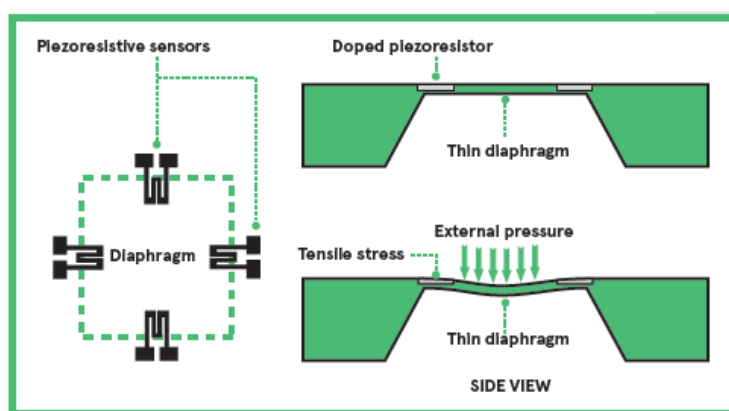


Рисунок 43 - Расположение чувствительных элементов датчика давления на гибкой диафрагме

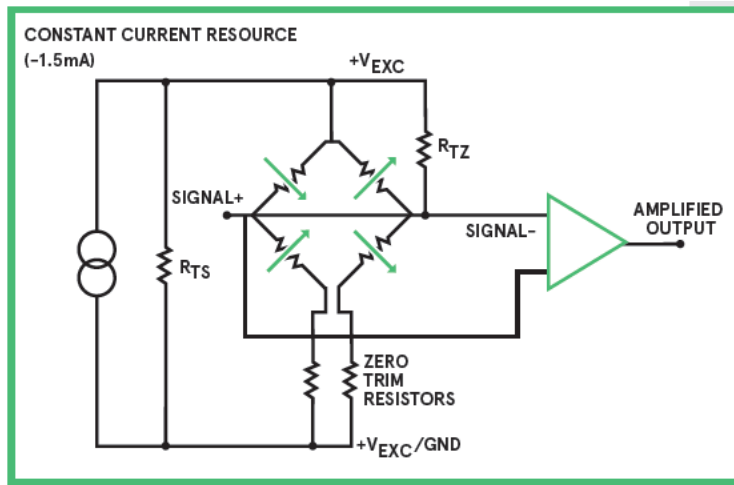


Рисунок 44 - Мостовая схема включения чувствительных элементов датчика давления с предыдущего рисунка

6. ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ [6-9]

Расход любой жидкости, которая полностью заполняет некоторый объем, определяется количеством вещества, проходящего через определенное сечение. Это количество вещества может быть определена двумя способами:

во-первых, можно говорить об объемном расходе Q_v

$$Q_v = \frac{dV}{dt}, \quad (29)$$

V - объем, t - время;

во-вторых, о массовом расходе Q_m

$$Q_m = \frac{dm}{dt}, \quad (30)$$

m -масса, t - время.



Рисунок 45 - Расход

Для измерения расхода измеряется скорость течения жидкости, при известном сечении осуществляется переход к расходу.

Получили распространение следующие методы измерения расхода:

1. Измерение скорости течения на основании закона Бернулли [6,7];
2. Создание препятствия в трубе, которая создает колебания потока с частотой, пропорциональной скорости потока (вихревые расходомеры, Vortex) [6,7];

3. Магнитоэлектрический метод, на основе закона Фарадея [6];
4. Ультразвуковой метод [6,9];
5. Тахометрические расходомеры [8].

6.1. Измерения расхода на основании закона Бернулли [6]

Закон Бернулли характеризует течение жидкости в трубе при прохождении ею сужения:

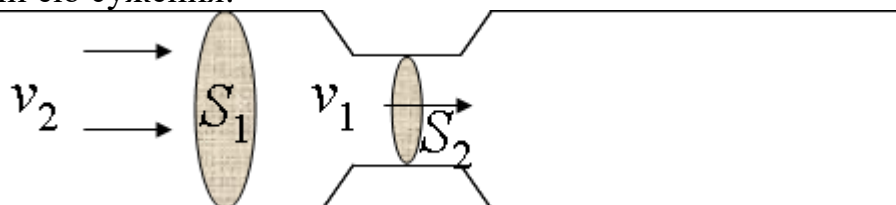


Рисунок 46 – Иллюстрация закона Бернулли

Согласно этому закону:

$$\Delta P = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2), \quad (31)$$

где ΔP перепад давления в потоке жидкости между входом и сужением в трубе; ρ - плотность жидкости; v_1 - скорость жидкости в сужении, v_2 - скорость жидкости перед сужением.

Скорость связана с объемным расходом соотношением:

$$v = \frac{Q}{S}, \quad S - \text{площадь сечения.}$$

Тогда:

$$\Delta P = \frac{Q^2 \rho}{2} \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right), \quad (32)$$

или :

$$\Delta P = kQ^2, \quad \text{где: } k = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} \right). \quad (33)$$

Пусть для измерения перепада давления использован, например, датчик 26PCSMТ (Honeywell) с диапазоном 34,475 кПа (рисунок 47).

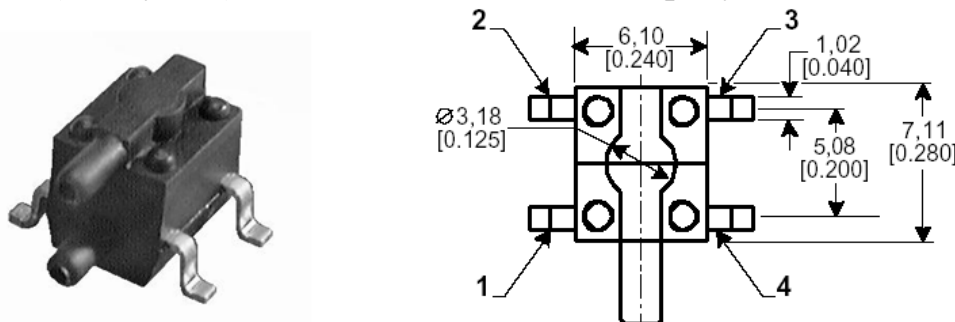


Рисунок 47 - Датчик давления 26PCSMТ (Honeywell)

Тогда можно выполнить расчет кривой $\Delta P = f(Q)$ по закону Бернулли. Если входной диаметр трубы $d_1 = 7$ мм и диаметр $d_2 = 4$ мм, то зависимость перепада давления от расхода имеет вид (рисунок 48).

При практической реализации уравнения Бернулли для целей измерения расхода необходимо учитывать, что плотность воды является функцией температуры. Эта зависимость приведена на рисунке 49.

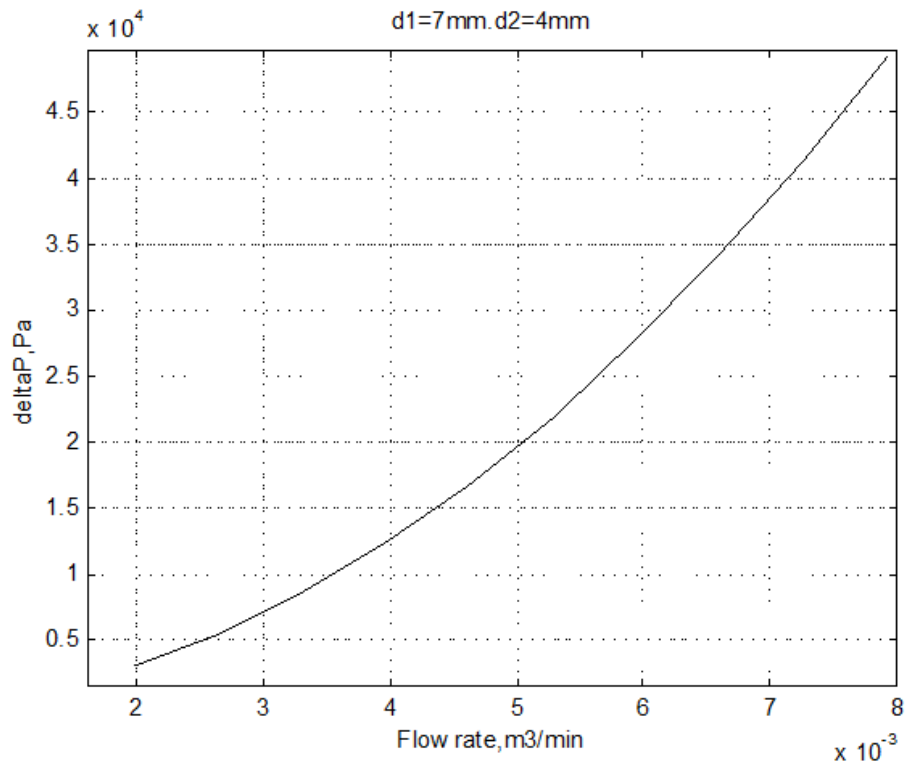


Рисунок 48 - Пример градуировочной кривой для расходомера на основе уравнения Бернулли, с диаметрами отверстий $d_2=7$ мм и $d_1=4$ мм

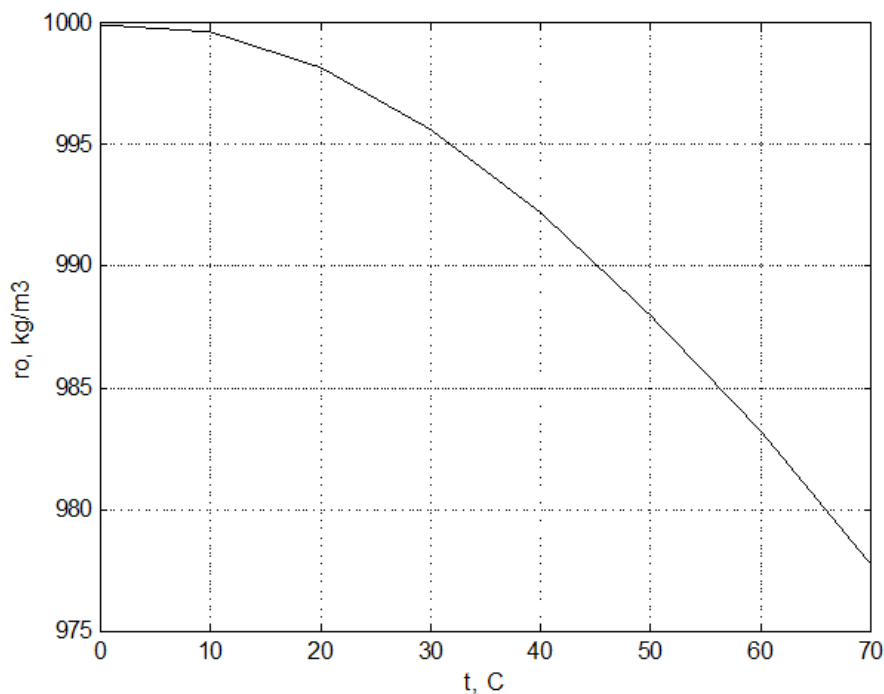


Рисунок. 49 - Зависимость плотности воды от температуры

6.2. Вихревые расходомеры [6,7]

Если жидкость при движении по каналу встречает препятствие, то за ним образуются вихри (рисунок 50) или дорожка Кармана (рисунок 51) [6].

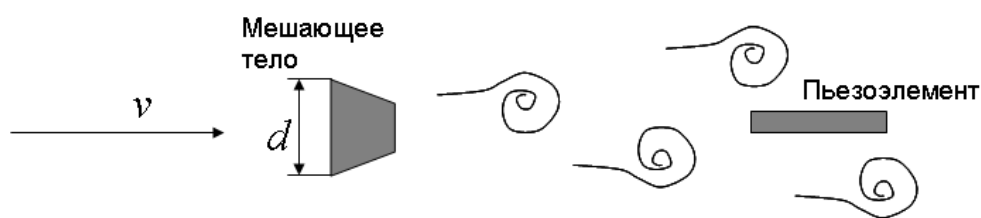


Рисунок 50 - Вихревой расходомер. Принцип действия



Рисунок 51 - Вихревое движение (дорожка Кармана) за препятствием [6]

Частота образования этих вихрей f прямо пропорциональна скорости потока v : Здесь используется эффект образования вихревой дорожки (дорожка Кармана¹) после находящегося в потоке мешающего тела. Частота образования этих вихрей зависит от так называемого числа Струхали мешающего тела, размера d и скорости потока жидкости v (рисунок):

$$f = Sh \frac{v}{d} \quad (34)$$

где: f - частота, $Sh = \frac{d}{vT}$ - число Струхали, v - скорость, d - размер мешающего тела, T - период биений [6,7].

Биения потока с частотой f регистрируются датчиком, пьезоэлементом. Градуировочная зависимость для расходомера, построенного на этом принципе имеет вид: $f = k \cdot v$, где $k = \frac{Sh}{d}$.

¹ Вихревая дорожка, Кармана дорожка, — регулярная, расположенная в определенном порядке система дискретных завихренных элементов жидкости, которая образуется за плоским, плохообтекаемым телом, помещённым в однородный поток со скоростью v , на бесконечности. (<http://aviapediya.ru/251/>)

6.3. Ультразвуковые расходомеры

Ультразвуковые расходомеры [6] используются в промышленности для измерений расхода жидкостей, газов и пара. Применяют два основных метода:

1. Доплеровский метод, этот процесс требует каких либо отражателей, или рассеивателей (твердых частиц) в среде. В настоящее время используется в основном в научных исследованиях.
2. Определение разницы времени прохождения звуком вдоль и поперек потока. В дополнение к измерению расхода дается возможность извлекать из результатов измерения скорости звука в данной среде информацию о природе жидкости.

Ультразвуковые измерения расхода с использованием метода измерения разности времени сегодня являются универсальной процедурой измерения расхода. Используется для измерения расхода различных жидкостей и газов: от криогенных жидкостей с температурой до -200°C , до горячих жидкостей и пара до 500°C при давлении до 1500 бар. Существуют также специальные версии, такие, как для измерения объема прокачанной жидкости в бытовых счетчиках тепла.

6.3.1. Некоторые особенности распространения ультразвука [6]

Ультразвуком являются звуки с частотами выше слышимого диапазона частот людей (>18 кГц). Рисунок 52 [6] показывает верхние границы диапазонов частот, которыми пользуются живые существа, и частоты, применяемые в ультразвуковых расходомерах.



Рисунок 52 - [6] Верхние границы диапазонов частот, которыми пользуются живые существа, и частоты, применяемые в ультразвуковых расходомерах.

В таблице 3 представлены скорости звука в различных средах.

Таблица 3. Скорости звука в различных средах

Газы	Среда	Скорость, м/с
	Воздух	330
Жидкости	Хлор	210
	Метан	430
	Водород	1280
	Вода	1480
Твердые тела	Метанол	1100
	Керосин	1320
	Глицерин	1900
	Сталь	5900
	Стекло	5600
	Бериллий	2900

На графике из (<http://mega-sensor.ru/articles/ultrazvukovye-datchiki-osobennosti-primeneniya-i-vybora.html>) представлена зависимость коэффициента затухания звука от частоты для воздуха (рисунок 53).

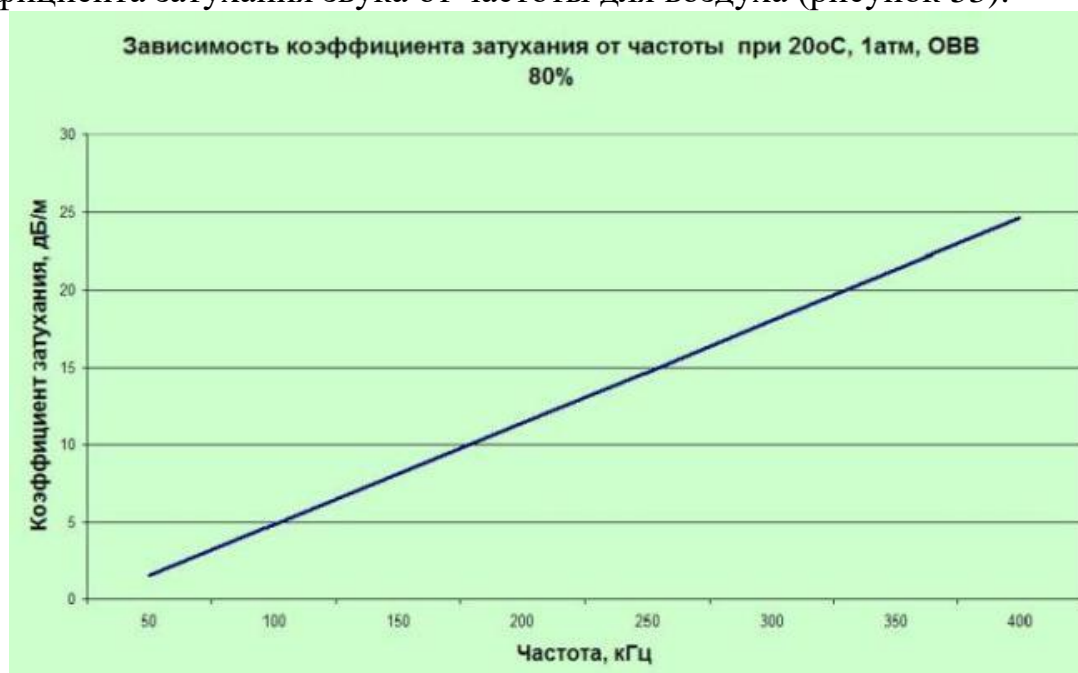


Рисунок 53 - Зависимость коэффициента затухания звука от частоты для воздуха

Для применения в расходомерах для жидкостей используют мегагерцовый диапазон, для газов – сотни кГц. При применении более высоких частот затухание становится слишком большим.

6.3.2. Расходомеры на основе эффекта Доплера

Эффект Доплера - изменение частоты и длины волны, регистрируемых

приёмником, вызванное движением их источника и/или движением приёмника².

Если источник движется по направлению к приёмнику, то есть догоняет испускаемую им волну, то длина волны уменьшается, если удаляется - длина волны увеличивается.

Пусть передатчик (рисунок 54) испускает ультразвуковые волны с частотой f_1 под углом α в потоке жидкости. Это ультразвуковая волна попадает на частицу, которая движется со скоростью v_p через звуковое поле.

Передатчик Приёмник

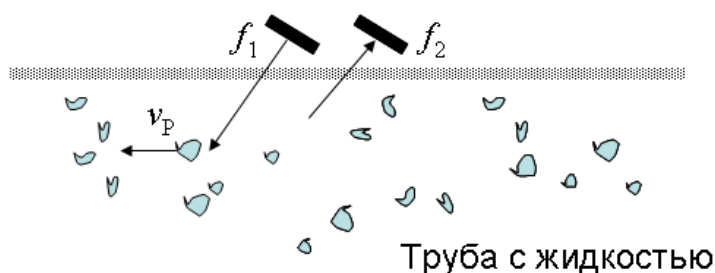


Рисунок 54 - Доплеровский ультразвуковой расходомер

Длина излучаемой волны λ_1 с частотой f_1 :

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_1} \quad (35)$$

Для частицы, удаляющейся от передающего элемента, благодаря своей скорости движения v_p , длина волны:

$$\lambda_p = (c - v_p \cdot \cos \alpha) / f_1.$$

Приемник теперь воспринимает отраженную назад частоту, которая снова изменилось, так как отражающая частица дальше ушла от него, и, следовательно, изменения в длине волны:

$$\lambda_2 = (c - 2 \cdot v_p \cdot \cos \alpha) / f_1.$$

Тогда

$$f_2 = \frac{f_1 \cdot c}{c - 2 \cdot v_p \cdot \cos \alpha} \text{ и для } v_p \ll c :$$

$$f_2 - f_1 = \Delta f = \frac{2 \cdot v_p \cdot f_1 \cdot \cos \alpha}{c} \quad (36)$$

эта разность частот пропорциональна скорости частицы.

6.3.3. Расходомер на основе измерения времени прохождения звука

Для измерений используются пьезоэлектрические излучатели, расположенные на трубе под углом α (рисунок 55). Каждый из излучателей

² <http://ru.wikipedia.org/>

одновременно является приемником сигнала, прошедшего через движущуюся жидкость.

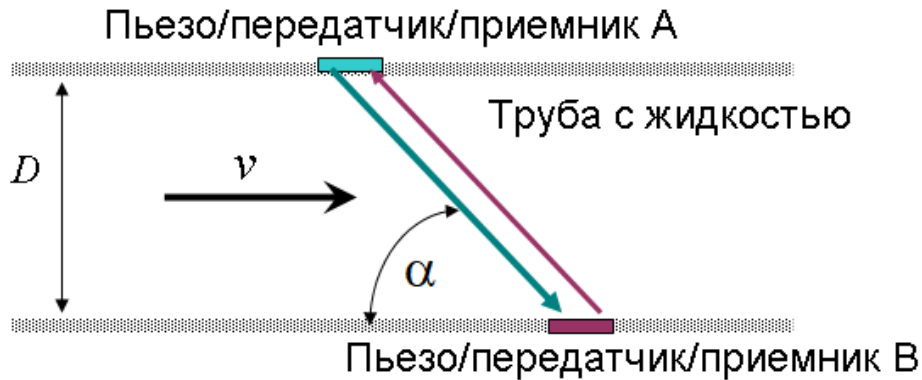


Рисунок 55 - Расходомер на основе измерения времени прохождения звука

Время прохождения сигнала от излучателя А к В:

$$T_{A \rightarrow B} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c + v \cdot \cos \alpha)} \quad (37)$$

Время прохождения сигнала от излучателя В к А:

$$T_{B \rightarrow A} = \frac{D}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{(c - v \cdot \cos \alpha)}$$

Разница между этими временами:

$$\Delta T = T_{B \rightarrow A} - T_{A \rightarrow B} = v \cdot \frac{T_{B \rightarrow A} \cdot T_{A \rightarrow B} \cdot \sin(2\alpha)}{D} \quad (38)$$

Разница времени прохождения ΔT пропорциональна средней скорости потока v . Но эта разница во времени выполнения очень мала. Следующий пример из [6] показывает ее величину.

Пример величин времени прохождения и разницы времен:

Диаметр трубы:	100 мм
Угол испускания α :	45°
Среда:	Вода
Скорость звука:	1480 м/с
Скорость течения:	1 м/с
Время по потоку:	95.49 мкс
Время против потока:	95.59 мкс
Разница ΔT :	91.29 нс

Если требуется разрешение 0.5%, то требуется временное разрешение < 500 пс или измерение времени прохождения с разрешением:

$$T_{A \rightarrow B} = 95.4949 \text{ мкс и } T_{B \rightarrow A} = 95.5862 \text{ мкс.}$$

Чтобы обеспечить измерение небольшого изменения измеряемой величины при измерениях расхода, разница времени должна измеряться с разрешением в диапазоне пикосекунд.

Ограничением для акустических методов является то обстоятельство, что звуковые волны - это волны давления, которые генерируют механические колебания в среде. Высокая вязкость подавляет это движение и,

следовательно, распространение звуковых волн. Это определяет границу применимости акустических методов. Как правило, этот предел намного выше значений, которые встречаются на практике.

6.4. Электромагнитные расходомеры [7]

Если электропроводная жидкость течет в трубе и ее пересекает магнитное поле, то она ведет себя, как проводник, распределенный по сечению трубы, и в ней возникает электрический ток (рисунок 56). Вследствие этого между электродами возникает напряжение, пропорциональное скорости течения жидкости. Жидкость, текущая в трубе, ведет себя как проводник. В стенке трубы перпендикулярно магнитному полю и направлению потока, диаметрально противоположно, расположены два электрода. Наведенное магнитным полем напряжение снимается с этих электродов.

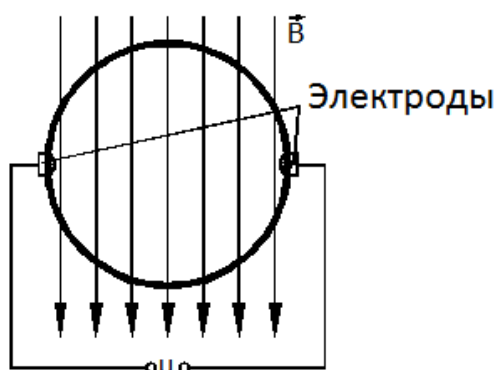


Рисунок 56 - Схематическое изображение электромагнитного расходомера

Это напряжение можно выразить как

$$U = k \cdot B \cdot D \cdot \bar{v}, \quad (39)$$

где: k – коэффициент, отражающий свойства жидкости, B – напряженность магнитного поля, D – диаметр трубы, \bar{v} – средняя скорость течения.

Тогда объемный расход:

$$Q_v = \frac{\pi D^2}{4} \bar{v} = \frac{1}{4k} \frac{\pi D}{B} U \quad (40)$$

Электрохимические процессы, неоднородность потока жидкости, изменчивость свойств жидкости, загрязнения не дают достичь достаточно высокой точности измерений расхода. Также на показания влияют паразитные токи, протекающие по трубе, мусор с ферромагнитными свойствами, неоднородностям, пузырькам и т.д.

Электромагнитные расходомеры используют в диапазоне от $3 \cdot 10^{-9}$ м³/с до 3 м³/с [7].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Глава 1.

1. Область применения оптических датчиков.
2. Какие особенности включения разных типов оптических датчиков?
3. Типы оптопар и различия между ними.

Глава 2.

1. Датчики магнитного поля, области применения.
2. Эффект Холла и его применение.

Глава 3.

1. Термоанемометр. Конструктивные особенности.

Глава 4.

1. Что такое температура?
2. В чем разница между эмпирическими шкалами и термодинамической шкалой?
3. Какие особенности получения результата необходимо знать при использовании термометров?
4. Схемы включения термометров сопротивления.
5. Основные особенности неконтактных методов измерения температуры.

Глава 5.

1. Чем отличаются абсолютное и относительное давление?
2. Типы датчиков давления.

Глава 6.

1. Область применения расходомеров.
2. Типы расходомеров.
3. В чем заключается основное преимущество вихревого расходомера?
4. Особенности применения ультразвуковых расходомеров.
5. Принцип действия электромагнитного расходомера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киттель Ч. Статистическая термодинамика. М: Наука, 1977
2. Гордов А.Н. Основы пирометрии. М. Металлургия, 1971.
3. Температурные измерения. Справочник/Геращенко О.А., Гордов А.Н. и др.; Отв. ред. Геращенко О.А. Киев: Наукова думка, 1989.
4. Поскачей, А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 246,[1] с. : ил.; 22 см.; ISBN 5-283-01477-0
5. <http://d.17-71.com/2009/04/14/termoparyi-tipyi-i-obschee-opisaniesposobyi-podklyucheniya/>
6. Pressure sensors: The design engineer's guide.
<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/>
7. Bonfig K.W. Technische Durchflussmessung. Taschenbuch: Auflage: 3 Vulkan-Verlag Essen, 2002
8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т.Емцев и др.; По общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина М.: Энергоиздат, 1982 - 512 с., ил. - (Теплоэнергетика и теплотехника)
9. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества. Справочник.: Кн.1- 5-е изд. перераб. и доп.– СПб.: Политехника, 2002
10. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник. Кн. 2/ Под общ. Ред. Е.А. Шорникова– - 5-е изд. перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004

Лукьянов Геннадий Николаевич

Сенсоры и датчики физических величин

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49