

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Энергетический

Кафедра Тепловые электрические станции

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

 Н.Б. Карницкий

29 03 2018 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан

 К.В. Доброго

29. 03 2018 г.

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ
ДИСЦИПЛИНЕ

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И
ИЗМЕРЕНИЯ

для специальности

1-53 01 04 «Автоматизация и управление
теплоэнергетическими процессами»

Составители:

доцент Назаров В.И.

ст. преп. Павловская А.А.

Рассмотрено и утверждено

на заседании Совета энергетического факультета «29» марта 2018 г.,

протокол № 7

Перечень материалов

1. Теоретический раздел:

- «Контрольно-измерительные приборы и измерения» - курс лекций;

2. Практический раздел:

- «Контрольно-измерительные приборы и измерения» - темы практических и лабораторных занятий; основные задачи, решаемые на практических занятиях;

3. Контроль знаний:

- «Контрольно-измерительные приборы и измерения» - перечни вопросов, выносимых на зачет и экзамен;

4. Вспомогательный раздел:

- «Контрольно-измерительные приборы и измерения» - учебная программа для учреждения высшего образования.

Пояснительная записка

Технологические процессы современных теплоэнергетических объектов требуют контроля большого числа параметров. Поэтому вопросам обеспечения надежного и достоверного контроля за ходом технологического процесса в настоящее время уделяется исключительное внимание. Без достоверных значений параметров и автоматического контроля за этими значениями нельзя управлять технологическими и теплоэнергетическими процессами и агрегатами, без средств измерения невозможна автоматизация. Особенно большое значение приобретают вопросы обеспечения высокой достоверности измеряемых параметров в связи с задачами комплексной автоматизации теплоэнергетических процессов.

Целью создания ЭУМК является подготовка специалистов по вопросам, затрагивающим методы и технические средства измерения теплотехнических величин.

Основной задачей преподавания учебной дисциплины является получение студентами знаний в области теории и практики измерения температур, давлений, расхода, уровня жидкостей и состава газообразных сред – величин, характеризующих теплотехнические процессы. А также подготовка специалиста к будущей практической деятельности.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении таких дисциплин как: «Метрология», «Физика», «Химия», «Электротехника и электроника». Изучение этой дисциплины формирует у студентов комплекс знаний и понимание принципа работы и устройства различных средств измерений, методов их выбора и расчета.

Знание курса «Контрольно-измерительные приборы и измерения» поможет студентам при последующем изучении специальных дисциплин, прохождении производственных практик, подготовке к государственному экзамену, написании и защите дипломного проекта.

Оглавление

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	5
Курс лекций	5
Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЯХ	5
Тема 1.1. Измерения, средства измерения, измеряемые величины и погрешности	5
Раздел II. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	15
Тема 2.1. Жидкостные и термоэлектрические термометры.....	15
Тема 2.2. Манометрические термометры и термометры сопротивления.....	22
Тема 2.3. Измерение температуры бесконтактными методами	30
Раздел III. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ	37
Тема 3.1. Магнитоэлектрические и цифровые милливольтметры. Потенциометры. Нормирующие преобразователи	37
Тема 3.3. Цифровые мосты. Потенциометрические аналоговые регистраторы	55
Раздел IV. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ, РАСХОДА И УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ	56
Тема 4.1. Измерение давления и разности давлений	56
Тема 4.2. Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры типа Анньюбар. Электромагнитные расходомеры. Вихревые расходомеры	74
Тема 4.3. Ультразвуковые расходомеры. Корреляционные расходомеры. Кориолисовый расходомер. Теплосчетчики.....	89
Тема 4.4. Измерение уровня жидкости	98
Раздел V. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ГАЗОВ	114
Тема 5.1. Отбор пробы газа. Термомагнитные газоанализаторы. Термокондуктометрические газоанализаторы. Оптико-акустические газоанализаторы	114
Тема 5.2. Термохимические газоанализаторы. Электрохимические газоанализаторы. Оптико-электрические газоанализаторы	121
Раздел VI. ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ.....	130
Тема 6.1. Передача информации средствами измерения	130
II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	143
Перечень тем практических занятий	143
Перечень тем лабораторных работ	143
Основные задачи, решаемые на практических занятиях.....	144
III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ	178
Перечень вопросов, выносимых на зачет	178

Перечень вопросов, выносимых на экзамен	178
IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ	180
Учебная программа учреждения высшего образования	180
по учебной дисциплине «Контрольно-измерительные приборы и измерения»	180

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Курс лекций

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ
ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЯХТема 1.1. Измерения, средства измерения, измеряемые величины и
погрешности.

Понятие об измерении. Если y – измеряемая величина, a – единица измерения, а c – числовое значение измеряемой величины в принятой единице, то результат измерения величины y :

$$y = ca, \quad (1.1)$$

где уравнение (1.1.) является уравнением измерения.

То есть **измерением** называется процесс получения опытным путем числового соотношения между измеряемой величиной и некоторым значением, принятым за единицу сравнения.

По способу получения числового значения искомой величины измерения можно разделить на два вида:

- прямые;
- косвенные.

К **прямым измерениям** относятся те, результаты которых получаются непосредственно из опытных данных. При этом значение искомой величины получается либо путем непосредственного сравнения ее с мерами, либо посредством измерительных приборов, градуированных в соответствующих единицах.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера, например, гиря – есть мера веса.

При прямых измерениях результат выражается непосредственно в тех же единицах, что и измеряемая величина.

$$y = z. \quad (1.2)$$

Здесь z – результат непосредственного измерения, например, измерение длины осуществляется метром; температуры – термометром, давления – манометром.

К **косвенным измерениям** относятся те, результат которых получается на основании прямых измерений нескольких других величин, связанных с искомой величиной определенной зависимостью.

В общем виде искомая величина y может быть определена некоторой функциональной зависимостью:

$$y=f(x_1, x_2, x_3, \dots x_n). \quad (1.3)$$

Здесь $x_1, x_2, \dots x_n$ - значения величин, измеряемых прямым способом, например, определение расхода газа по перепаду давления на сужающем устройстве.

Косвенные измерения применяются в технике и научных исследованиях в тех случаях, когда искомую величину невозможно или сложно измерить непосредственно путем прямого измерения или когда косвенное измерение позволяет получить более точные результаты. В зависимости от назначения и от предъявляемой к ним точности измерения делятся на лабораторные и технические.

Под **принципом измерения** понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Под **методом измерений** понимается совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Понятия о средствах измерения. Средствами измерений называют технические средства, предназначенные для измерений и имеющие нормированные метрологические характеристики, воспроизводящие и (или) хранящие единицу физической величины, размер которой принимают неизменной (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Основными видами средств измерений являются меры, измерительные приборы и преобразователи.

Измерительным прибором называют средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой физической величины в установленном диапазоне.

Измерительным преобразователем называют техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измеряющий сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Основные понятия о метрологических характеристиках средств измерений. Качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, называется **точностью измерения**.

Погрешность измерения - отклонение результата измерения, т.е. величины, найденной путем ее измерения, от истинного значения измеряемой физической величины.

Под истинным значением физической величины понимают такое ее значение, которое идеальным образом отразило бы в количественном и качественном отношениях соответствующее свойство объекта измерения.

Погрешность измерения вызывается несовершенством средств измерений, непостоянством условий наблюдения и субъективными ошибками наблюдателя. На практике вместо истинного значения приближенно принимают действительное значение (находится экспериментально). Погрешности

показаний средств измерений принято делить на абсолютные, относительные или приведенные.

Абсолютная погрешность измерительного прибора определяется разностью между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины.

$$\Delta y = y_n - y. \quad (1.4)$$

Здесь y_n - показания прибора, y – действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению физической величины.

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y}. \quad (1.5)$$

Приведенная погрешность измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению.

$$\delta = \frac{\Delta y}{y_n} \cdot 100\%. \quad (1.6)$$

Здесь y_n – нормирующее значение.

Нормирующее значение принимается равным:

- для средств измерений с односторонней шкалой – по верхнему пределу измерений;
- для средств измерений с двухсторонней шкалой – арифметической сумме модулей верхнего и нижнего пределов измерений;
- для средств измерений с безнулевой шкалой – разности верхнего и нижнего пределов, т.е. диапазону измерений.

Погрешности средств измерений принято разделять на **основные** и **дополнительные**.

Основной погрешностью средства измерений называется его погрешность при использовании в нормальных условиях. Под пределом допускаемой основной погрешности понимают наибольшую (без учета знака) основную погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению, эту погрешность называют допускаемой основной погрешностью.

Под нормальными условиями применения средств измерений понимают условия, при которых величины, называемые влияющими (температура воздуха, влажность, атмосферное давление и т. д.) имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. В качестве нормальных значений принимают:

$$t_{\text{окруж. воздуха}} = 20^\circ\text{C}; P_{\text{атм.}} = 101,3 \text{ кПа}; \text{относительную влажность} - 60\%.$$

Дополнительной называют погрешность, возникающую при отклонении влияющих величин за пределы, установленные для нормальных их значений.

Класс точности средства измерений является обобщенной его характеристикой, определяемой пределами допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Чаще всего класс точности принимают численно равным допускаемой приведенной основной погрешности, выражаемой в процентах:

$$K = \frac{\Delta y}{y_n} 100\% = \delta. \quad (1.7)$$

Класс точности выбирается из ряда $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$; , где $n=1;0;-1;-2$ и т.д.

Погрешности измерения в зависимости от характера причин, вызывающих их появление, принято разделять на случайные, систематические и грубые.

Под **случайной погрешностью** понимают погрешность измерения, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Они могут быть количественно определены с помощью теории вероятностей и методов статистики.

Под **систематической погрешностью** понимают погрешность измерения, остающуюся постоянной (аддитивная составляющая) или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях одной и той же величины (мультипликативная составляющая). Если систематическая погрешность известна, то она может быть исключена путем внесения поправки. Поправка равна абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком.

Под **грубой погрешностью** измерения понимается погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях. Причина грубой погрешности – ошибки наблюдателя или неисправности устройств измерения.

Вариация показаний – наибольшая полученная экспериментально разность между повторными показаниями прибора при увеличении величины и при ее уменьшении в одной и той же точке шкалы.

$$V = \frac{y_{\bar{o}} - y_m}{y_n} 100\%, \quad (1.8)$$

где $y_{\bar{o}}$ – значение показаний прибора при повышении величины;

y_m – значение показаний прибора при понижении измеряемой величины.

Причинами вариаций показаний в приборах являются люфты, трение и т. д.

Чувствительность средства измерения – отношение изменения сигнала на выходе Δy к вызывающему его изменению измеряемой величины Δx , то есть:

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \text{ – для прибора с линейной характеристикой и}$$

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right| = \frac{dy}{dx} - \text{для прибора с нелинейной характеристикой.}$$

Порог чувствительности прибора - наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать перемещение указателя.

Оценка погрешностей при технических измерениях. Точность результата прямого измерения при применении измерительного прибора прямого действия:

$$\delta_{\Pi} = (\delta + \delta_{un} + \delta_m). \quad (1.9)$$

Здесь δ – предел допускаемой основной погрешности применяемого измерительного прибора, %; δ_m – методическая погрешность, %; δ_{un} – изменение показаний данного прибора, вызванное отклонением влияющих величин за пределы, установленные для нормальных значений или для нормальной области значений, согласно:

$$\delta_{un} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{uni}^2}. \quad (1.10)$$

Здесь δ_{uni} – изменение показаний прибора, вызванное отклонением i -й влияющей величины, %.

Прямые технические измерения могут производиться измерительным комплектом, включающим как минимум два элемента. Для каждого элемента, входящего в измерительный комплект или канал, метрологические характеристики задаются в объеме, позволяющем определить предел допускаемой погрешности результата измерений. Суммирование пределов допускаемых погрешностей, особенно при большом числе последовательно включенных элементов дает завышенную оценку предела погрешности, поскольку вероятность совпадения знаков погрешностей и их предельных значений у всех элементов системы невелика. В связи с этим допускаемая погрешность измерительной системы, состоящей из n элементов, оценивается как

$$\delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}.$$

Эта оценка справедлива, если погрешности независимы и носят случайный характер. Если преобладает в погрешности систематическая составляющая, то допускаемая погрешность измерительной системы равна:

$$\delta = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}.$$

Оценка результата косвенного измерения при наименее благоприятном случае (максимальная абсолютная погрешность):

$$\Delta y = \left(\left| \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \right) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \Delta x_i \right|. \quad (1.11)$$

Здесь Δx_i – абсолютная погрешность прямого однократного измерения величины x_i .

Тогда максимальную относительную погрешность можно оценить как:

$$\delta_y = 100 \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|. \quad (1.12)$$

Так как нельзя ожидать, что неблагоприятный случай будет часто встречаться, при оценке точности результата измерения целесообразно производить квадратичное суммирование:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}; \quad (1.13)$$

$$\delta_y = 10 \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (1.14)$$

Оценка и учет случайных погрешностей. Случайные погрешности являются результатом воздействия большого числа факторов, не зависящих один от другого. Каждый из этих факторов оказывает малое влияние на результаты измерения, однако суммарное влияние всех факторов может быть значительным. К числу этих факторов относятся влияние температуры на те или иные части измерительного прибора, вибрация, обратимые изменения характеристик измерительного преобразователя, например, в результате гистерезиса, трения в опорах измерительных приборов и т.п. Погрешности отдельных измерений имеют разброс, как по величине, так и по знаку. Хотя эти погрешности точно определить нельзя, их можно оценить и охарактеризовать с помощью статистических методов. При многократных измерениях одной и той же величины и наличии случайных погрешностей результаты измерений также являются случайными величинами. Они будут полностью описаны с вероятностной точки зрения, если задана функция распределения вероятностей $F(x)$, характеризующая вероятность P появления тех или иных значений x , $F(x) = P[x_i \leq x]$. Функция $F(x)$ является монотонно нарастающей $F(-\infty) = 0$, $F(\infty) = 1$, $dF(x) / dx \geq 0$. Часто для характеристики случайной величины используется производная функция распределения $f(x) = dF(x) / dx$, называемая плотностью распределения.

В практике измерений при большом числе опытов ($n > 20$) используется *нормальный закон* описания функции *распределения*. Он представляет собой двухпараметрический закон, для которого определено аналитическое выражение плотности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.15)$$

где m_x – наиболее вероятное значение измеряемой величины X , которое оценивается как среднее арифметическое результатов n измерений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ по формуле

$$m_x = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) / n = \sum_{i=1}^n x_i / n \quad (1.16)$$

Чем больше число измерений n , тем ближе m_x к истинному значению измеряемой величины. В (1.15) σ является *средним квадратическим отклонением* случайной величины, определяемым по формуле

$$\begin{aligned} \sigma &= \left\{ (x_1 - m_x)^2 + \dots + (x_n - m_x)^2 \right\} / (n-1)^{0,5} = \\ &= \left[\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 / (n-1) \right]^{0,5} \end{aligned} \quad (1.17)$$

Случайные погрешности для каждого результата измерения запишем в виде

$$\Delta_i = x_i - m_x \quad (1.18)$$

они представляют центрированную случайную величину, для которой

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 / (n-1) \right]^{0,5}, \quad f(\Delta) = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) e^{-\Delta^2 / (2\sigma^2)} \quad (1.19)$$

Значения функции нормального распределения определяются по (1.19) численными методами и приведены в таблице 1.1 для значений аргумента $z = \Delta / \sigma$. Графики нормального распределения

$$\Phi(z) = \int_{-\infty}^z f(z) dz = 1/(\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^z e^{-z^2 / 2} dz$$

и плотности распределения $f(\Delta)$ представлены на рисунке 1.1. Увеличение σ (рисунок 1.1б) приводит к снижению максимума плотности распределения и растягиванию функции, поскольку

$$1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\Delta^2/(2\sigma^2)} d\Delta = 1$$

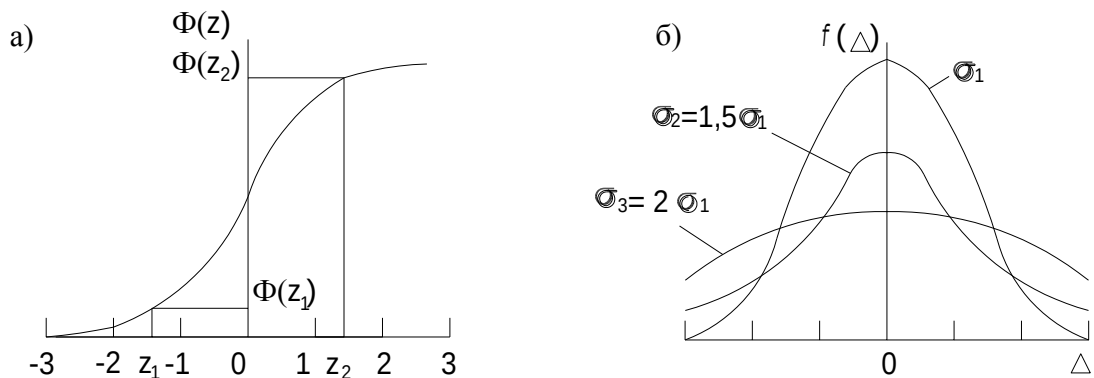


Рисунок – 1.1. Графики нормального распределения (а) и плотности распределения (б)

Для результатов измерений случайной величины x $F(x) = F(\Delta) = \Phi(z)$. С использованием данных таблицы 1.1, зная m_x и σ , можно ответить на вопросы:

- какова вероятность появления результата измерения меньше x_1 ;
- какова вероятность появления результата больше x_2 ;
- какова вероятность появления результата измерений в интервале $x_1 - x_2$?

Если $z_1 = (x_1 - m_x) / \sigma$, $z_2 = (x_2 - m_x) / \sigma$, то $P[x \leq x_2] = \Phi(z_2)$, $P[x > x_2] = 1 - \Phi(z_2)$, $P[x_1 < x \leq x_2] = \Phi(z_2) - \Phi(z_1)$. При нормальном распределении случайных погрешностей 68 погрешностей из 100 ($P = 0,68$) по модулю меньше σ , 95 погрешностей ($P = 0,95$) меньше 2σ и только три погрешности из тысячи ($P = 0,997$) будут иметь значения по модулю больше 3σ . Интервал, в котором результаты измерений $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ находятся с заданной вероятностью, называется толерантным. Число, ограничивающее этот интервал, обозначают как t_p . В рассмотренном примере значения t_p равны соответственно 1; 2; 3. В связи с малой вероятностью появления погрешностей больше 3σ ($p = 0,003$) погрешности по модулю указанной величины обычно относят к промахам и исключают из ряда результатов измерений.

Таблица 1.1. Значения нормальной функции распределения

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
-0,00	0,5000	-1,30	0,0968	0,00	0,5000	1,30	0,9032
-0,05	0,4801	-1,35	0,0885	0,05	0,5199	1,35	0,9115
-0,10	0,4602	-1,40	0,0808	0,10	0,5398	1,40	0,9192
-0,15	0,4404	-1,45	0,0735	0,15	0,5596	1,45	0,9265
-0,20	0,4207	-1,50	0,0668	0,20	0,5793	1,50	0,9332
-0,25	0,4013	-1,55	0,0606	0,25	0,5987	1,55	0,9394
-0,30	0,3821	-1,60	0,0548	0,30	0,6179	1,60	0,9452
-0,35	0,3632	-1,65	0,0495	0,35	0,6368	1,65	0,9505
-0,40	0,3446	-1,70	0,0446	0,40	0,6554	1,70	0,9554
-0,45	0,3264	-1,75	0,0401	0,45	0,6736	1,75	0,9599
-0,50	0,3085	-1,80	0,0359	0,50	0,6915	1,80	0,9641
-0,55	0,2912	-1,85	0,0322	0,55	0,7088	1,85	0,9678
-0,60	0,2743	-1,90	0,0288	0,60	0,7257	1,90	0,9712
-0,65	0,2578	-1,95	0,0256	0,65	0,7422	1,95	0,9744
-0,70	0,2420	-2,00	0,0228	0,70	0,7580	2,00	0,9772
-0,75	0,2266	-2,20	0,0139	0,75	0,77734	2,20	0,9861
-0,80	0,2119	-2,40	0,0082	0,80	0,7881	2,40	0,9918
-0,85	0,1977	-2,60	0,0047	0,85	0,8023	2,60	0,9953
-0,90	0,1841	-2,80	0,0026	0,90	0,8159	2,80	0,9974
-0,95	0,1711	-3,00	0,0014	0,95	0,8289	3,00	0,9986
-1,00	0,1587	-3,20	0,0007	1,00	0,8413	3,20	0,9993
-1,05	0,1469	-3,40	0,0003	1,05	0,8531	3,40	0,9997
-1,10	0,1357	-3,60	0,0002	1,10	0,8643	3,60	0,9998
-1,15	0,1251	-3,80	0,0001	1,15	0,8749	3,80	0,9999
-1,20	0,1151			1,20	0,8849		
-1,25	0,1056			1,25	0,8944		

Для среднего значения результатов измерений m_x среднее квадратичное значение отклонения от истинного значения составляет $\sigma_{mx} = \sigma / \sqrt{n}$. Чем больше проведено измерений, тем ближе среднее значение к истинному значению измеряемой величины. Для характеристики отклонения среднего значения от истинного вводится понятие доверительного интервала. Доверительный интервал откладывается в обе стороны от среднего значения ряда измерений $m_x \pm \varepsilon_p$ и охватывает истинное значение X с заданной доверительной вероятностью p ,

$$\varepsilon_p = t_p \sigma_{mx} = t_p \sigma / \sqrt{n} \quad (1.20)$$

Таким образом, с доверительной вероятностью p истинное значение измеряемой величины лежит в пределах доверительного интервала $m_x \pm \varepsilon_p$, но его нельзя точно указать.

Все рассмотренные выражения справедливы для большого числа однородных измерений, когда имеет место нормальный закон распределения погрешностей. В этом заключается особенность измерения случайных величин. При малом числе измерений для оценки доверительного интервала используется распределение Стьюдента, в котором значения t зависят не только от доверительной вероятности, но и от числа произведенных измерений. Значения $t_{p(n-1)}$ в функции вероятности и числа произведенных измерений $(n-1)$ приведены в таблице 1.2. Таким образом, при числе измерений менее 20 – 30 для оценки доверительного интервала следует использовать распределение Стьюдента и тогда

$$\varepsilon_p = t_{p(n-1)} \sigma / \sqrt{n} \quad (1.21)$$

Снижение числа измерений приводит к расширению доверительного интервала при той же самой доверительной вероятности. Так, если для нормального распределения вероятности 0,95 соответствует $t_p = 2$, то при числе измерений 10 и 3 и использовании распределения Стьюдента $t_{p(n-1)}$ составляет соответственно 2,262 и 4,303.

Таблица 1.2. Значения $t_{p(n-1)}$ распределения Стьюдента для симметричного интервала и $t_{p(n-1)} / \sqrt{n}$.

p	0,683		0,9		0,95		0,997	
$n - 1$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)} / \sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)} / \sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)} / \sqrt{n}$	$t_{p(n-1)}$	$t_{p(n-1)} / \sqrt{n}$
1	1,833	1,296	6,314	4,465	12,71	8,987	234,8	166,0
2	1,283	0,741	2,920	1,686	4,303	2,484	18,72	10,81
3	1,197	0,598	2,353	1,176	3,182	1,591	9,005	4,502
4	1,142	0,511	2,132	0,953	2,776	1,241	6,485	2,900
5	1,110	0,453	2,015	0,823	2,571	1,050	5,404	2,206
6	1,089	0,412	1,943	0,734	2,447	0,925	4,819	1,821
7	1,075	0,380	1,895	0,670	2,365	0,836	4,455	1,575
8	1,066	0,355	1,859	0,620	2,306	0,769	4,209	1,403
9	1,058	0,334	1,833	0,580	2,262	0,715	4,032	1,275
10	1,052	0,317	1,812	0,546	2,228	0,672	3,898	1,175
12	1,042	0,289	1,782	0,494	2,179	0,604	3,711	1,029
14	1,036	0,267	1,761	0,455	2,145	0,554	3,586	0,926
16	1,031	0,250	1,746	0,423	2,120	0,514	3,496	0,848

18	1,027	0,236	1,734	0,398	2,101	0,482	3,430	0,787
20	1,024	0,223	1,725	0,376	2,086	0,455	3,378	0,737
30	1,016	0,182	1,697	0,305	2,042	0,367	3,230	0,580

Раздел II. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Тема 2.1. Жидкостные и термоэлектрические термометры

Общие понятия и определения. Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Она является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобно тому, как созданы эталоны экстенсивных величин (длина, масса и другие).

Измерить температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических термометрических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению (длина, объем, плотность и т. д.). Средство измерений температуры называют термометром. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу, т.е. конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства.

Для построения первых температурных шкал (Фаренгейт, Реомюр, Цельсий) выбирали две опорные, или реперные точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия химически чистых веществ. Разность температур $t_2 - t_1$ называли основным температурным интервалом. При построении шкалы основывались на допущении линейной связи между температурой t и расширением объема жидкости V . В шкалах Фаренгейта, Реомюра и Цельсия точке плавления льда t_1 соответствовали $+ 32$; 0 и 0° , а точке кипения воды $t_2 - 212$; 80 и 100° . Основной интервал $t_2 - t_1$ в этих шкалах делится соответственно на

$N = 180$, 80 и 100 равных частей, и $1/N$ часть каждого из интервалов называют градусом Фаренгейта - $t^\circ\text{F}$, градусом Реомюра - $t^\circ\text{R}$ и градусом Цельсия - $t^\circ\text{C}$. Таким образом градус не является единицей измерения, а представляет собой единичный промежуток - масштаб шкалы.

Для пересчета температуры из одной указанной шкалы в другую используют соотношение

$$t^\circ\text{C} = 1,25^\circ\text{R} = (5/9)(t^\circ\text{F} - 32) \quad (2.1)$$

Однако показания термометров, имеющих разные термометрические вещества (ртуть, спирт и др.), использующих одно и то же термометрическое свойство и равномерную градусную шкалу, совпадают лишь в реперных точках, а в других точках показания расходятся. Это объясняется тем, что связь между температурой и термометрическим свойством на самом деле нелинейна и эта

нелинейность различна для различных термометрических веществ. В связи с этим перечисленные температурные шкалы называют условными, а масштабы этих шкал - условными градусами.

В 1848 году Кельвином была создана термодинамическая шкала, не зависящая от термометрических свойств веществ. Термодинамическая шкала температур основана на использовании второго закона термодинамики и называется абсолютной шкалой температур. Чтобы абсолютная температура имела определенное значение, было предложено принять разность термодинамических температур между точками кипения воды $T_{к.в.}$ и таяния льда $T_{т.л.}$ равной 100° . Таким образом один градус термодинамической температуры равен $1/100$ части работы, совершаемой в цикле Карно между температурой кипения воды и таяния льда (при условии, что в обоих циклах количество теплоты, отдаваемой холодильнику, одинаково).

Температура таяния льда по абсолютной термодинамической шкале составляет $T_0 = 273,15 \text{ К}$. Любая температура в шкале Кельвина определяется как $T = 273,15 \text{ К} + t$ (где t - температура в $^\circ\text{C}$). Один градус Кельвина (1 К) соответствует одному Цельсия (1°C), так как обе шкалы базируются на одинаковых реперных точках.

Однако термодинамическая шкала обладает недостаточной точностью измерения, т.к. температуры принятых реперных точек зависят от изменения давления, а также от незначительных примесей в воде. Кельвином и независимо от него Д.И. Менделеевым были высказаны соображения о целесообразности построения термодинамической шкалы температур по одной реперной точке - тройной точке воды (точке равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах). Температура этой точки принята равной $273,16 \text{ К}$, т.е. выше температуры точки таяния льда на $0,01 \text{ К}$.

С 1968 года определение единицы термодинамической температуры было принято в следующей редакции: "Кельвин - $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды". Термодинамическая температура может быть также выражена в градусах Цельсия: $t = T - 273,15 \text{ К}$.

В 1968 г. принята на XIII конференции по мерам и весам "Международная практическая температурная шкала" (МПТШ - 68), которая базируется на 11 основных и 27 вторичных реперных точках, охватывающих диапазон от $13,965$ до 3660 К (от $-259,194$ до 3387°C).

В 1990 г. была принята «Международная температурная шкала» (МТШ-90). Шкала МТШ-90 является наиболее близкой на настоящий момент возможной аппроксимацией термодинамической температурной шкалы. Близость аппроксимации в основном определяется точностью измерения термодинамических температур реперных точек – фазовых переходов чистых веществ. В таблице 2.1 приведены некоторые отличия по реперным точкам МПТШ-68 и МТШ-90.

Таблица 2.1.

Термодинамические температуры реперных точек, °C		Реперная точка
МПТШ-68	МТШ-90	
231,9681	231,928	затвердевание олова
419,568	419,527	затвердевание цинка
961,93	961,78	затвердевание серебра
100	99,974	кипение воды

Классификация средств измерений температуры в зависимости от используемого термометрического свойства тел и диапазона измерений представлена в таблице 2.2.

По способу взаимодействия средства измерения со средой при измерении температуры термометры подразделяют на контактные и бесконтактные.

Жидкостные термометры. Принцип работы жидкостных термометров расширения основан на использовании различных коэффициентов теплового расширения термометрической жидкости и материала оболочки термометра. В качестве рабочих веществ применяют ртуть, этиловый спирт, толуол и др.

Таблица 2.2. Классификация средств измерений температуры

№	Термометрическое свойство	Наименование средства	Диапазон измерений, °C
1	Изменение объема	Термометры расширения: жидкостные дилатометрические	-190 ÷ 650
2	Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме	Манометрические термометры: газовые жидкостные конденсационные	-150 ÷ 600 -150 ÷ 600 -50 ÷ 350
3	Термоэлектрический эффект (термо ЭДС)	Термоэлектрические преобразователи	-200 ÷ 2500
4	Изменение электрического сопротивления	Термопреобразователи сопротивления: металлические полупроводниковые	-260 ÷ 1100 -240 ÷ 300
5	Тепловое излучение	Пирометры излучения: квaziмонохроматические спектрального соотношения радиационные	700 ÷ 6000 1400 ÷ 2800 50 ÷ 3500

Жидкостные термометры являются местными показывающими приборами, точность показаний которых во многом зависит от способа установки. Неправильная установка термометра приводит к большой потере тепла в окружающую среду и может вызвать занижение показаний на 10 - 15%.

При точных измерениях температур с помощью ртутных термометров к их показаниям вводят поправки:

- основную Δt (принимается из свидетельства термометра);
- на температуру выступающего столбика ртути Δt_b по формуле

$$\Delta t_b = \alpha_b(t_t - t_b) \cdot n, \quad (2.2)$$

где α_b - температурный коэффициент видимого расширения ртути в стекле, K^{-1} ;

n - число градусов в выступающей части ртутного столбика;

t_t - показания ртутного термометра, $^{\circ}C$;

t_b - средняя температура выступающего столбика ртути, $^{\circ}C$.

- на смещение положения нулевой точки Δt_c . Периодически определяется в процессе эксплуатации с помощью термостата по точке таяния льда и в случае обнаружения отклонения вычисляется по формуле

$$\Delta t_c = t_0 - t'_0, \quad (2.3)$$

где t_0 и t'_0 - температуры, соответствующие положению нулевой точки термометра по свидетельству и после очередной поверки нуля, $^{\circ}C$.

Цена деления шкалы технических термометров расширения находится в пределах от 0,5 до 10 $^{\circ}C$. Для лабораторных термометров цена деления шкалы находится в пределах от 0,1 до 2 $^{\circ}C$ (повышенной точности – от 0,01 до 0,1 $^{\circ}C$). Допускаемая погрешность технических термометров не должна превышать цены деления шкалы.

К dilatометрическим термометрам относятся стержневой и пластинчатый (биметаллический), действие которых основано на относительном удлинении под влиянием температуры двух твердых тел, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения. Получили применение в качестве чувствительных элементов в сигнализаторах температуры и для компенсации влияния температуры окружающего воздуха на показания приборов.

Термоэлектрические термометры. Принцип действия основан на возникновении термо-ЭДС в двух разнородных проводниках при различных температурах мест их соединения. Термоэлектрические термометры имеют широкий диапазон измерения: от -200 до 2200 $^{\circ}C$ (кратковременно до 2500 $^{\circ}C$), могут измерять температуру в точке объекта или измеряемой среды, отличаются достаточно высокой точностью и стабильностью характеристик преобразования, но несколько уступают по этим показателям термометрам сопротивления. В таблице 2.3 приведены основные параметры стандартных электрических термометров.

Таблица 2.3. Основные параметры термоэлектрических термометров

Тип термометра	Материал термоэлектродов	Диапазон длительного измерения температуры, °С	Допускаемая кратковременная температура, °С	Термоэлектродные (компенсационные) провода
ТВР (А-1,2,3)	Вольфрамрений (5% рения) - вольфрамрений (20% рения)	0 - 2200	2500	--
ТПР (В)	Платинородий (30% родия) - платинородий (6% родия)	300 - 1600	1800	--
ТПП (S,R)	Платинородий (10% родия) - платина	0 - 1300	1600	Медь – сплав ТП (99,4% Cu+0,6%Ni)
ТХА (К)	Хромель - алюмель	-200 ÷ 1000	1300	Медь – константан
ТХК (L)	Хромель - копель	-200 ÷ 600	800	Хромель-копель
ТМК (Т)	Медь - копель	-200 ÷ 100	100	Медь-копель
ТНН (N)	Нихросил-нисиловая	-200 ÷ 1200	1300	

К числу недостатков можно отнести необходимость стабилизации или автоматического введения поправки на температуру свободных концов и необходимость применения специальных термоэлектродных проводов для подключения термометров к вторичным приборам.

Выпускаются термоэлектрические термометры различных исполнений: погружаемые и поверхностные; переносные; разового применения, многократного применения; обыкновенные, водозащитные, взрывобезопасные, защищенные от агрессивных сред и других внешних воздействий; негерметичные и герметичные; малой (МИ), средней (СИ) и большой (БИ) инерционности; обыкновенные и виброустойчивые; одинарные, двойные и тройные - три чувствительных элемента (спая) в одном корпусе (чехле); с открытым спаем, с закрытым (изолированным или неизолированным) спаем; кабельные термометры, которые могут входить как составная часть в другие термопреобразователи, но могут использоваться и самостоятельно.

На рисунке 2.1 а показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект

измерения и крепится на нем с помощью штуцера 9. Для обеспечения надежного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП). Защитную гильзу 1 выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15—25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500—3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет 2—3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью. Стандартные ТЭП выпускают одинарными, двойными и поверхностными — для измерения температуры стенок объекта, когда доступ внутрь объекта затруднителен или невозможен.

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (рисунок 2.1, б, в).

В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (рисунок 2.1, б) или изолируется от нее (рисунок 2.1, в). Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5—6 мм, длиной 10—30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от —50 до 300°С при давлении 40 мПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

В таблице 2.4. приведены формулы для вычисления пределов допускаемых отклонений термо-ЭДС от номинального значения.

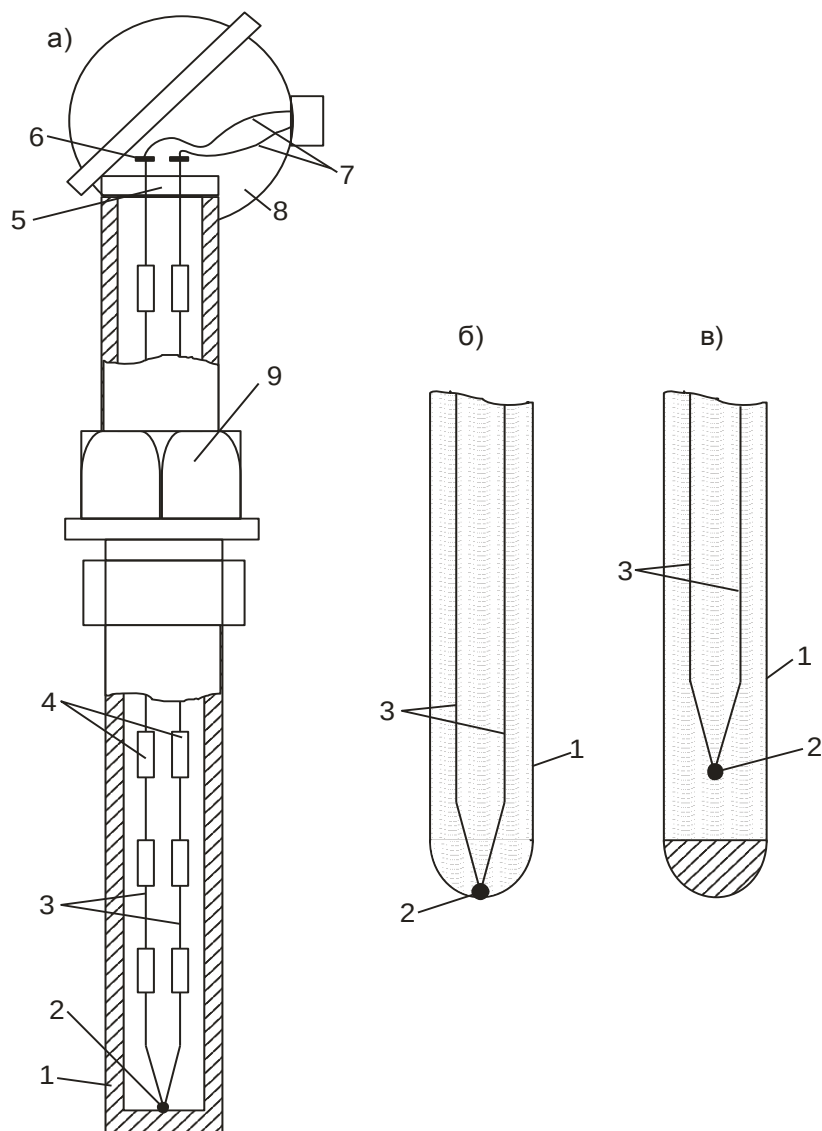


Рисунок 2.1 – Конструкция термоэлектрических термометров
а), б) с малой инерционностью;
в) с большой инерционностью

Таблица 2.4. Формулы для вычисления пределов допускаемых отклонений термо-ЭДС термоэлектрических термометров от номинального значения

Тип термометра	Диапазон измеряемых температур, °C	Предел допускаемого отклонения термо-ЭДС от номинального значения $\pm \Delta E$, мВ	Предел от НСХ, °C
ТВР (А-1,2,3)	0 - 1000	0,080	5-15
	1000 - 1800	$0,080 + 3,80 \cdot 10^{-5}(t-1000)$	
	1800 - 2500	$0,110 + 11,0 \cdot 10^{-5}(t-1800)$	
ТПР(В)	300 - 1800	$0,009 + 3,4 \cdot 10^{-5}(t-300)$	4-6
ТПП (S,R)	0 - 300	0,008	1,5-4
	300 - 1600	$0,008 + 2,69 \cdot 10^{-5}(t-300)$	
ТХА (К)	-200÷0	$0,080 + 0,30 \cdot 10^{-3}(t+200)$	1,5-5
	0 - 300	0,140	

	300 - 1300	$0,134+0,22 \cdot 10^{-3}(t-300)$	
ТХК (L)	-200 ÷ 0 0 - 300 300 - 800	$0,100+0,2 \cdot 10^{-3}(t+200)$ $0,140+ \cdot 10^{-3} t$ $0,200+0,52 \cdot 10^{-3}(t-300)$	1,5-5
ТМК (Т)	-200 ÷ 0 0 - 100	$0,026+1,45 \cdot 10^{-4}(t+200)$ 0,055	0,5-1,5
ТНН (N)	-40 - ± 375 375 - 1000	- -	± 1,5 ± 0,004t

П р и м е ч а н и е. t - температура конца термометра.

Как видно из таблицы 2.6. наиболее целесообразно применять для измерения температур ниже нуля термопары типа Т, для температур до 300°C – типа К, от 300°C до 600°C – типа N, свыше 600°C – типа К или N.

Тема 2.2. Манометрические термометры и термометры сопротивления

Манометрические термометры. Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. Манометрические термометры состоят из термобаллона 1, деформационного элемента 3 и капиллярной трубки 2, соединяющей последний с термоболлоном (рисунок 2.2 а, б). Чувствительный элемент термометра (термобаллон) погружается в объект измерения и термометрическое вещество в баллоне достигает температуры измеряемой среды. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется давление, которое через капиллярную трубку передается на пружинный манометр. Изменение давления можно определить исходя из выражения (для газа)

$$P = P_o(1+\beta t),$$

где P_o – давление газа при $t = 0^\circ\text{C}$; β – термический коэффициент давления, 1/град.

Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Геометрические размеры термобаллона зависят от типа термометров и от задач измерения. Так, диаметр термобаллона находится в пределах 5-30мм, а его длина 60-500мм. Капилляр представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1-0,5мм, а его длина может быть от нескольких сантиметров до 60 метров.

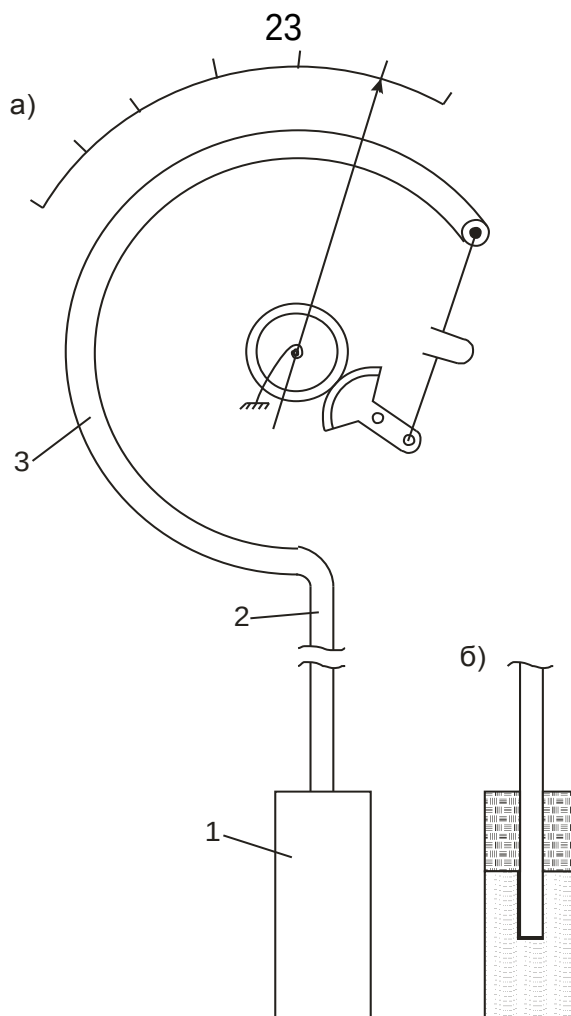


Рисунок 2.2 – Схема манометрического термометра

В соответствии с агрегатным состоянием рабочего вещества в термосистеме манометрические термометры подразделяют на газовые (диапазон измерения – 150-600°C), жидкостные (диапазон измерения – 50-600°C) и конденсационные (диапазон измерения – 25-300°C).

В газовых термометрах используется азот, гелий. В жидкостных – ртуть, ксилол, метиловый спирт, а в конденсационных – ацетон, бензол, хлористый метил.

Погрешность манометрических термометров не превышает 2,5 %. Класс точности для них устанавливается для последней 2/3 шкалы.

Погрешность измерения манометрическими термометрами включает:

- основную, вызываемую несовершенством работы деформационного элемента;

- дополнительные погрешности, вызываемые:

- 1) изменением барометрического давления;
- 2) изменением температуры окружающего воздуха у газовых и жидкостных термометров;

- 3) изменением гидростатического давления у жидкостных и конденсационных термометров при установке термобаллона и пружины на разных высотах.

Для компенсации дополнительной погрешности, вызванной изменением барометрического давления, рабочее вещество находится под высоким давлением до 2-3 МПа. Для компенсации температурной погрешности выбирают объем термобаллона $V_{тб}$ и объем капилляра V_k и деформационного элемента $V_{дэ}$ так, что $V_{тб} \gg (V_k + V_{дэ})$.

Термометры сопротивления. Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. К металлическим термометрам сопротивления предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность градуировочной характеристики, а также ее воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термометров. К числу не основных, но желательных требований относятся: линейность функции $R_t=f(t)$, по возможности высокое значение температурного коэффициента термопреобразователя сопротивления $\alpha = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt}$, большое

удельное сопротивление и невысокая стоимость материала. Установлено, что чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным основным требованиям. По стандартам МЭК, ASTM, DIN, BS для платины $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, по российским стандартам $\alpha = 0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha = 0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Платина является наилучшим материалом для термометров сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления и высокое удельное сопротивление $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Платиновые термометры сопротивления используются для измерения температуры от -260 до $+1100^\circ\text{C}$. В интервале температур от -200°C до 850°C сопротивление и температура связаны зависимостью

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3], \text{ для } -200^\circ\text{C} \leq t \leq 0^\circ\text{C}$$

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \text{ для } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 850^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

где $A = 3,969 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -5,841 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $C = -4,33 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$, (для $\alpha = 0,00391 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

К недостаткам платины можно отнести нелинейность функции $R_t=f(t)$ и ее высокую стоимость. Выпускаются платиновые термометры сопротивления следующих градуировок: 10П; 50П; 100П; 500П, 1000П. Число в условном обозначении показывает сопротивление термометра при 0°C , а буква – материал чувствительного элемента.

Медь – один из недорогих металлов, легко получаемых в чистом виде. Медные термометры сопротивления предназначены для измерения температуры в диапазоне от -180 до $+200^\circ\text{C}$. При более высоких температурах медь активно окисляется. Зависимость сопротивления от температуры линейна в широком диапазоне температур и имеет вид

$$R_t = R_0 (1 + At), \text{ для } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 200^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

где $A = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления приведена на рисунке 2.3.

Тонкая проволока или лента 1 из платины или меди наматывается на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. Бифилярная намотка необходима для исключения индуктивного сопротивления. После намотки проволоки каркас покрывают слюдой. Длина намотки с платиновой проволокой 50-100мм, а с медной – 40мм. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней и защитной гильзой 3 устанавливают упругие металлические пластины 4 или массивный металлический вкладыш. Гильзу 3 с ее содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чехла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9.

Выпускаются следующие градуировки медных термометров сопротивления 10М; 50М; 100М. В таблице 2.5 и 2.6 приведены основные показатели, позволяющие оценивать допустимые отклонения характеристик термометров от номинальных значений.

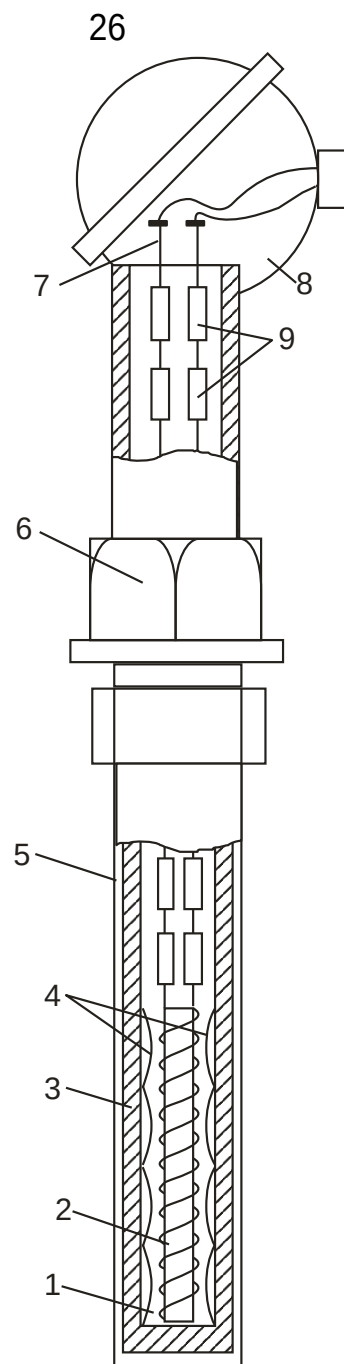


Рисунок 2.3 – Конструкция термометра с металлическим термопреобразователем сопротивления

Таблица 2.5. Допустимое отклонение сопротивления R_0 термометров при 0°C от номинального значения

Условное обозначение номинальной статической характеристики преобразователя		Класс допуска	Номинальное значение сопротивления при 0°C , R_0 , Ом	Допускаемое отклонение от номинального значения сопротивления при 0°C	
в странах СНГ	международное			$\pm\%$	$\pm$ Ом
50П	Pt50	А	50	0,05	0,025
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		0,05
50П, 50М	Pt50, Cu50	В	50	0,1	0,1
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		
50П, 50М	Pt50, Cu50	С	50	0,2	0,2
100П, 100М	Pt100, Cu100		100		

П р и м е ч а н и е: для платиновых термосопротивлений дополнительно введен класс допуска АА.

В последнее время широкое распространение за рубежом получили пленочные термосопротивления на основе полупроводниковых материалов.

Они имеют очень малые размеры (толщина пленки полупроводника составляет 10^{-6} м), большое номинальное сопротивление (до 1 кОм) и соответствуют стандарту МЭК. Причем являются самыми дешевыми и самыми продаваемыми сенсорами. Диапазон измерения пленочных термосопротивлений составляет от -50°C до 600°C . Классы допуска у них такие же как и у платиновых термосопротивлений.

Таблица 2.6. Отношение сопротивления термометров при 100°C к сопротивлению при 0°C .

Тип термопреобразователя сопротивления	Класс допуска	В странах СНГ		Международное	
		α , $^\circ\text{C}^{-1}$	наименьшее допускаемое значение R_{100}/R_0	α , $^\circ\text{C}^{-1}$	наименьшее допускаемое значение R_{100}/R_0
ТСП	А	0,00391	1,3905	0,003850	1,3845
	В		1,3900		1,3840
	С		1,3895		1,3835
ТСМ	В	0,00428	1,4270	0,00426	1,4250
	С		1,4260		1,4240

Новые конструкции термоэлектрических преобразователей. В настоящее время изменились технологии изготовления термоэлектрических преобразователей. В частности, широкое применение стали получать термоэлектрические преобразователи из термopарного кабеля КТМС с использованием импульсной лазерной сварки рабочего спая, микропроцессорные датчики температуры, датчики температуры с унифицированными выходными сигналами, интеллектуальные преобразователи температуры.

Микропроцессорный преобразователь состоит из первичного преобразователя, помещенного в защитную арматуру (термозонд) и микропроцессорного преобразователя, встроенного в головку (рисунок 2.4).

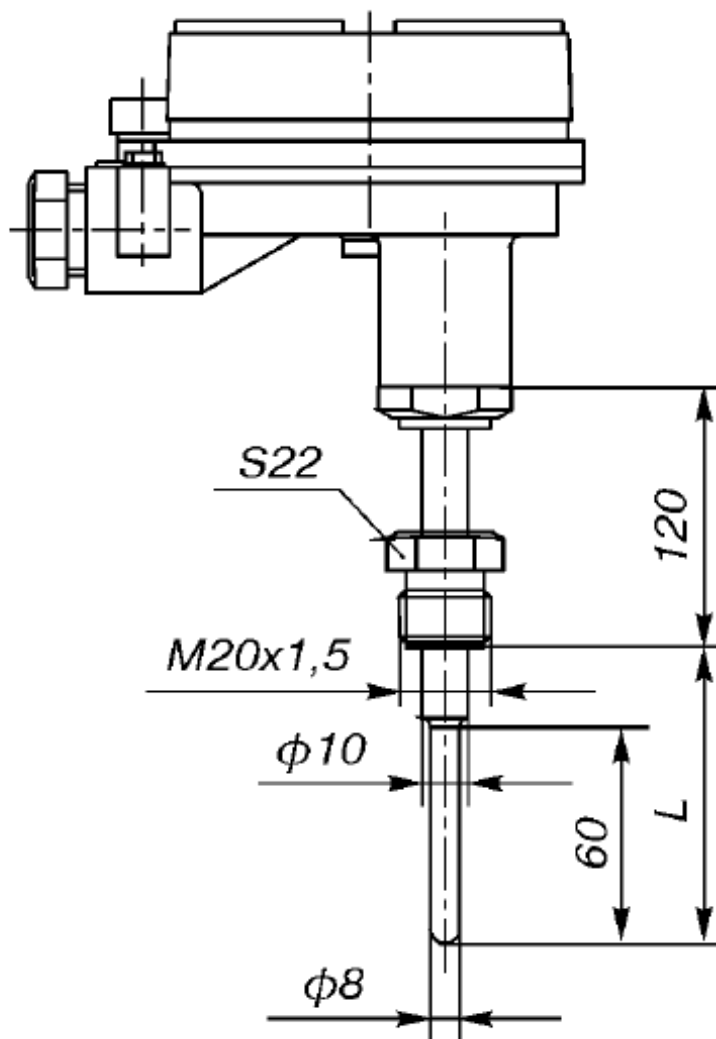


Рисунок 2.4 – Конструкция микропроцессорного преобразователя

Микропроцессорный преобразователь позволяет осуществлять:

- перенастройку диапазона преобразуемых температур;
- детектирование обрыва или короткого замыкания первичного преобразователя температуры;
- самодиагностику;
- линеаризацию номинальной статической характеристики чувствительного элемента;

- перенастройку номинальной статической характеристики в случае замены чувствительного элемента на другой тип;
- калибровку датчика под индивидуальную статическую характеристику чувствительного элемента по 2...8 температурным точкам для повышения его точности;
- выбор времени демпфирования измеряемого сигнала;
- автоматическую компенсацию изменения температуры холодных спаев термоэлектрического преобразователя.

Использование термопреобразователей с унифицированным выходным сигналом и микропроцессорных преобразователей дает возможность построения АСУ ТП без применения нормирующих преобразователей.

Интеллектуальные преобразователи температур состоят из термозонда и электронного модуля, встроенного в корпус соединительной головки.

В качестве первичного термопреобразователя используются чувствительные элементы из термопарного кабеля КТМС (ХА) или резистивные чувствительные элементы из платиновой проволоки.

Электронный модуль осуществляет:

- контроль перенастройки диапазонов измерений температуры с учетом минимальной разницы между верхним и нижним значениями диапазона;
- детектирование обрыва или короткого замыкания первичного преобразователя температуры;
- самодиагностику состояния интеллектуального преобразователя температуры;
- линеаризацию номинальной статической характеристики чувствительного элемента первичного преобразователя температуры;
- автокомпенсацию изменения термо-ЭДС от изменения температуры холодных спаев чувствительного элемента первичного преобразователя температуры.

При обнаружении неисправности в режиме самодиагностики выходной сигнал устанавливается в состояние, соответствующее нижнему ($I_{\text{вых}} \leq 3,77\text{мА}$) сигналу тревоги.

HART-протокол позволяет получить более подробную диагностическую информацию о неисправности конкретного компонента первичного преобразователя температуры или электронного модуля, например, ошибка при тестировании контроллера, обрыв/неисправность ППТ и др.

В многоточечном режиме датчик работает в режиме только с цифровым выходом. Аналоговый выход автоматически устанавливается в 4 мА и не зависит от значения входной температуры. Информация о температуре считывается по HART протоколу. К одной паре проводов может быть подключено до 15 датчиков. Их количество определяется длиной и качеством линии, а так же мощностью блока питания датчиков. Каждый датчик в многоточечном режиме имеет свой уникальный адрес от 1 до 15, и обращение к датчику идет по этому адресу. В обычном режиме датчик имеет адрес 0; если ему присваивается адрес от 1 до 15, то датчик автоматически переходит в многоточечный режим и устанавливает выход в 4мА. Коммуникатор или АСУ ТП определяет все датчики, подключенные к линии, и может работать с каждым из них.

Установка многоточечного режима не рекомендуется в случае, если требуется искробезопасность.

Тема 2.3. Измерение температуры бесконтактными методами

Пирометры. Пирометрами называют устройства для бесконтактного измерения температуры, использующие тепловое электромагнитное излучение нагретых тел. Теоретически верхний предел измерения температуры пирометрами излучения не ограничен.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т.е. излучает волны всех длин λ в диапазоне от 0 до ∞ . Видимое глазами человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн 0,40 - 0,75 мкм. Невидимые лучи охватывают инфракрасный участок спектра, т.е. диапазон от 0,75 до 400 мкм, за которыми следует постепенный переход в радиоволновой диапазон. Лучи с $\lambda < 0,40$ мкм также невидимы и относятся к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

В пирометрах излучения используют в основном лучи видимого и инфракрасного диапазонов. Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для абсолютно черного тела. Так как излучательная способность реальных тел меньше, чем черных, то показания пирометра будут соответствовать не действительной температуре реального тела, а условной.

Интенсивность частичного излучения черного тела $E_{\lambda,T}$ (Вт/м³) описывается уравнением Планка

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2.6)$$

где C_1 и C_2 — постоянные ($C_1 = 3,71 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м · К);
 λ — эффективная длина волны, м;
 T — температура тела, К;
 e — основание натуральных логарифмов.

Для области видимых лучей и сравнительно невысоких температур (до 2900К) уравнение (2.6) может быть упрощено, если отбросить вычитаемую в скобках единицу, причем ошибка в определении $E_{\lambda,T}$ не будет превышать 1% . Упрощенное уравнение, предложенное Вином, имеет вид

$$E_{\lambda,T} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) положено в основу измерения температуры по интенсивности частичного излучения (яркости) нагретого тела в лучах

эффективной длины волны λ , равной обычно 0,65 мкм (красный цвет), при помощи приборов, называемых *пирометрами частичного излучения*.

Интенсивность суммарного излучения E_T (Вт/м²) черного тела при различных температурах может быть найдена путем интегрирования уравнения (2.6) в пределах изменений λ от 0 до ∞ . В результате получаем уравнение Стефана-Больцмана:

$$E_T = \sigma T^4, \quad (2.8)$$

где σ — постоянная, равная $5,75 \cdot 10^{-16}$ Вт/(м²·К⁴).

Уравнение (2.8), в свою очередь, положено в основу измерения температуры по интенсивности суммарного излучения (радиации) нагретого тела посредством приборов, называемых *пирометрами суммарного излучения*.

Пирометры, измеряющие яркостную температуру по спектральной яркости в видимой части спектра, называют **оптическими** и **фотоэлектрическими**.

Яркостной температурой T_{λ} реального тела называют такую температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная яркость равна спектральной яркости реального тела при его действительной температуре. Яркостная температура всегда меньше действительной.

$$\frac{1}{T_{\lambda}} = \frac{1}{T} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}}, \quad (2.9)$$

где ε_{λ} - спектральный коэффициент излучения; T – температура реального тела, К.

Яркостные измерения отличаются высокой чувствительностью, так как спектральная энергетическая яркость резко возрастает с повышением T . Определение T по специальной энергетической яркости принципиально возможно для любой длины волны. Практически же определяют T по интенсивности излучения обычно в красной области видимого спектра.

Приборы, измеряющие температуру по значению отношения энергетических яркостей в двух спектральных интервалах, называют **цветовыми пирометрами** или **пирометрами спектрального отношения**.

Цветовой температурой T_{λ_1, λ_2} называют такую температуру черного тела, при которой отношение его спектральных энергетических яркостей при определенных длинах волн равно отношению спектральных энергетических яркостей реального тела при тех же длинах волн.

$$\frac{1}{T_{\lambda_1, \lambda_2}} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}, \quad (2.10)$$

где ε_{λ_1} и ε_{λ_2} - спектральные коэффициенты излучения соответственно для длины волн λ_1 и λ_2 .

Цветовые измерения при высоких температурах не обладают высокой чувствительностью, но если проводить измерения температуры на участке видимого спектра, то ε_{λ_1} и ε_{λ_2} будут мало отличаться друг от друга и T_{λ_1, λ_2} будет мало отличаться от T .

Приборы, измеряющие температуру тела по их интегральной излучательности, называют **радиационными пирометрами** или **пирометрами полного излучения**. Если чувствительный элемент радиационного пирометра

воспринимает интегральную излучательность не во всем диапазоне волн от 0 до ∞ , а в некотором ограниченном интервале длин волн от λ_1 до λ_2 , то такой пирометр называют **пирометром частичного излучения**.

Радиационной температурой T_p реального тела, имеющего истинную температуру T , называют такую температуру черного тела, при которой его интегральная излучательность равна интегральной излучательности реального тела.

$$T_p = T \cdot \varepsilon_T^{-0,25} \quad (2.11)$$

где ε_T – полный коэффициент излучения. По сравнению с яркостными измерениями радиационные измерения обладают много меньшей чувствительностью, но технически осуществляются проще, чем яркостные. Из-за некорректной оценки ε_T радиационные измерения имеют большую погрешность, чем яркостные.

Пирометры излучения нашли применение для измерения температур в топках котельных установок.

Погрешность измерения температуры оптическими пирометрами составляет примерно $\pm 1,5 - 2,0\%$, радиационными $\pm 2,5 - 3,5\%$, а фотоэлектрическими $\pm 1,0 - 1,5\%$.

Наибольшее распространение имеют **оптические пирометры с «исчезающей нитью»**. В таких пирометрах спектральная яркость излучения измеряемого тела (на длинах волн $\lambda = 0,65$ мкм) сравнивается со спектральной яркостью излучения на тех же длинах волн нити электрической (пирометрической) лампы накаливания. На рис.2.5 а, б, в дано изображение нити лампы на фоне измеряемого раскаленного тела.

Если нить имеет температуру меньшую, чем температура тела, то будет казаться темной на светлом фоне (рис.2.5 а). Если нить будет иметь более высокую температуру, чем тело, то будет светлее фона (рис. 2.5 б). При равенстве яркостных температур нити и тела средняя часть нити исчезает (рис. 2.5 в) и по силе тока, питающего лампу, можно определить яркостную температуру нити, а следовательно, и яркостную температуру тела.

На рисунке 2.5 представлена схема оптического пирометра с «исчезающей нитью». Электрическая (пирометрическая или фотометрическая) лампа 1 питается от батареи Б. Сила питающего тока определяется по миллиамперметру мА, шкала которого градуируется в градусах яркостной температуры. Сила тока регулируется реостатом R с помощью поворотного кольца 4. Для фокусирования изображения тела с плоскостью нити служит объектив 5.

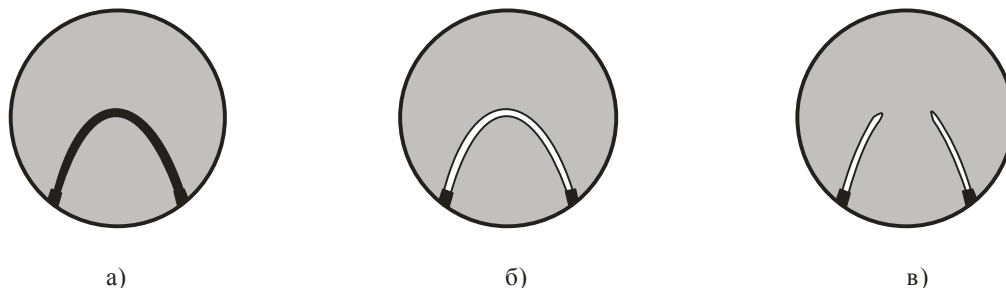


Рисунок 2.5 – изображение нити пирометрической лампы на фоне измеряемого раскаленного тела

Окуляр 2 предназначен для корректирования изображения нити по глазу наблюдателя. Красный светофильтр 3 служит для выделения определенной спектральной области излучения. Во избежание перекаливания нити, ее нельзя нагревать выше 1400°C . Поэтому при измерении более высоких температур необходимо использовать ослабляющий светофильтр 6. В этом случае температуре нити будут соответствовать другие, более высокие температуры измеряемого тела.

Оптические пирометры применяют в диапазоне температур от 700°C до 8000°C . Минимальное расстояние от объекта измерения до объектива пирометра равно 0,7, а максимальное – 5-6 м.

В фотоэлектрических пирометрах в качестве чувствительного элемента чаще всего используют фотоэлементы с внешним фотоэффектом, которые развивают фототок, пропорциональный падающему на него световому потоку или энергии излучения волн определенного участка спектра.

Фотоэлектрические пирометры позволяют производить измерения температуры без наблюдателя, осуществлять автоматическую запись температуры и могут быть использованы в системах автоматического управления производственными процессами.

Фотоэлектрические пирометры подобно оптическим с помощью красного светофильтра выделяют узкую спектральную область излучения с эффективной длиной волны порядка 0,65 мкм. На рисунке 2.6 приведена упрощенная схема фотоэлектрического пирометра типа ФЭП. Через объектив Об и диафрагму D_1 в плоскости одного из отверстий диафрагмы D_2 создается изображение измеряемого раскаленного тела Т, освещающее фотоэлемент Ф. Через другое отверстие диафрагмы D_2 фотоэлемент освещается регулируемым источником света - электрической лампой Л. Перед фотоэлементом располагается красный светофильтр КФ. Фотоэлемент поочередно с частотой 50 Гц освещается то измеряемым телом, то лампой. Поочередность освещения создается колеблющейся заслонкой 3 модулятора света В вибрационного типа. Фототок на выходе фотоэлемента усиливается электронным усилителем ЭУ, воздействующим на силу тока, питающую лампу Л. Сила тока измеряется на резисторе R быстродействующим автоматическим потенциометром БАП.

На выходе из фотоэлемента возникает фототок, определяемый освещенностью от измеряемого тела и лампы. При неравенстве этих освещенностей возникает переменная составляющая фототока. Переменная составляющая будет совпадать по фазе с переменным током, питающим лампу, если температура измеряемого тела будет меньше температуры лампы. Если же температура тела будет больше температуры лампы, то переменная составляющая будет находиться в противофазе с переменным током, питающим лампу.

Электронный усилитель имеет фазочувствительную схему и будет уменьшать или увеличивать силу тока, питающего лампу, стремясь выровнять температуру лампы и тела. При равенстве этих температур переменная составляющая на выходе из фотоэлемента будет равна нулю. Сила тока в лампе, однозначно связанная с яркостной температурой измеряемого тела, измеряется потенциометром БАП, отградуированным в градусах яркостной температуры.

Для увеличения верхнего предела измерения (выше 1300-1400°C) на пути светового потока устанавливается ослабляющий светофильтр.

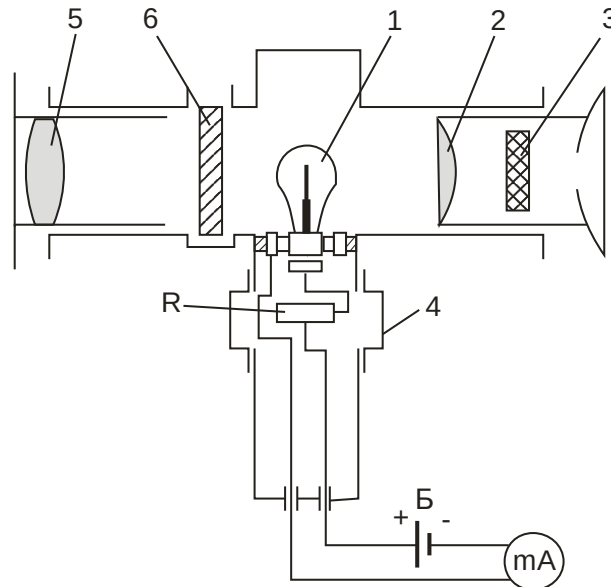


Рисунок 2.6 – Схема оптического (квазимонохроматического) пирометра

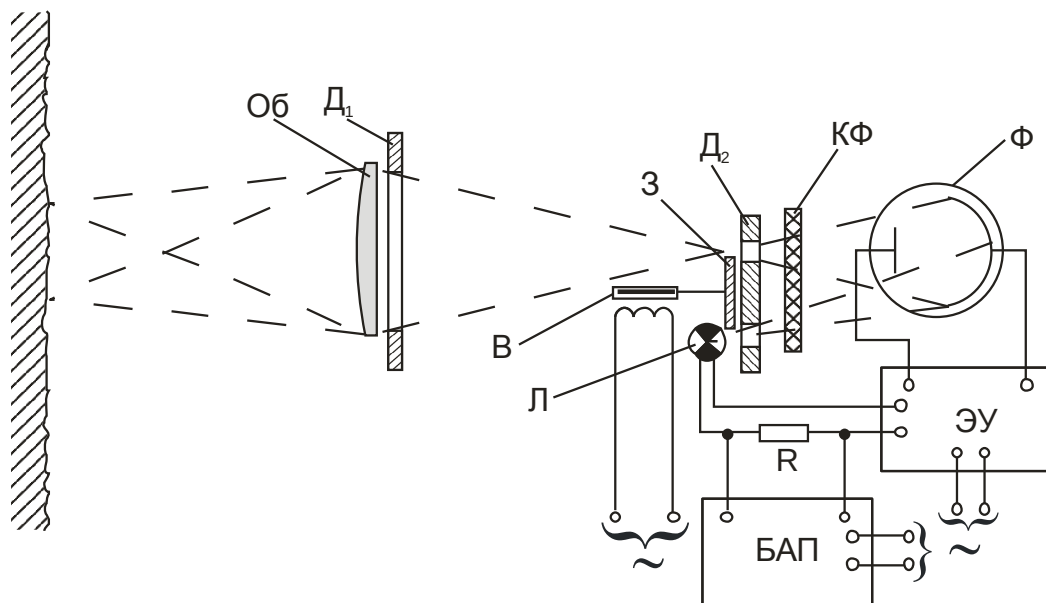


Рисунок 2.7 – Упрощенная схема фотоэлектрического пирометра типа ФЭП

Радиационные пирометры, или пирометры полного излучения, - это приборы, воспринимающие излучение от объекта во всем спектральном диапазоне. Но, строго говоря, приемники излучения имеют ограниченный рабочий диапазон волн и поэтому в пирометре используется не полный спектр излучения, а лишь определенная полоса спектра. Радиационные пирометры имеют самый широкий диапазон измерений от 50 до 2000°C и выше. Для пирометров этого типа могут быть использованы только тепловые приемники излучения – термоэлектрические преобразователи или термопреобразователи сопротивления.

На рисунке 2.8 приведена звездообразная термо - батарея, выполненная из десяти последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, в качестве которых обычно используются хромель-копелевые термоэлектроды диаметром 60-70 мкм. Плоские рабочие концы 1 преобразователей, зачерненные платиновой чернью, образуют венчик. Свободные концы термопреобразователей закреплены с помощью металлических пластин 2 на слюдяном кольце 3, зажатом между двумя такими же кольцами в корпусе телескопа.

Измерение термо-ЭДС, развиваемой термобатареей в приемнике излучения, производится милливольтметром или потенциометром, шкалы которых градуируют в значениях радиационной температуры.

Измерение температуры радиационными пирометрами основано на улавливании теплового излучения и концентрировании его на термочувствительном элементе с помощью собирающей линзы (рефракторные приборы) или вогнутых зеркал (рефлекторные приборы). На рисунке 2.9 приведена схема радиационного пирометра рефракторного типа.

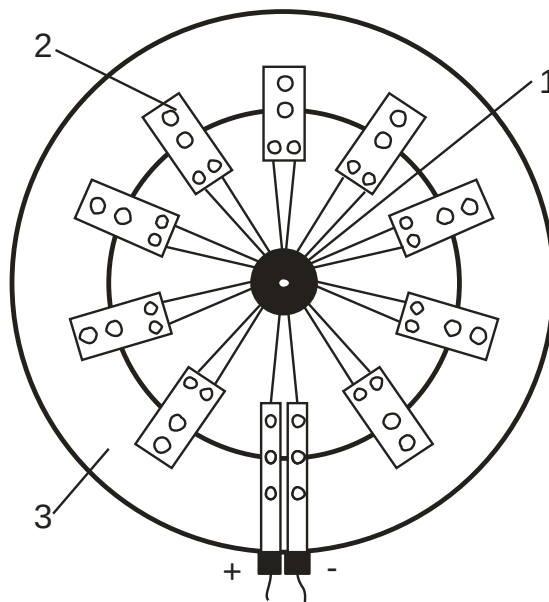


Рисунок 2.8 – Звездообразная термо-батарея

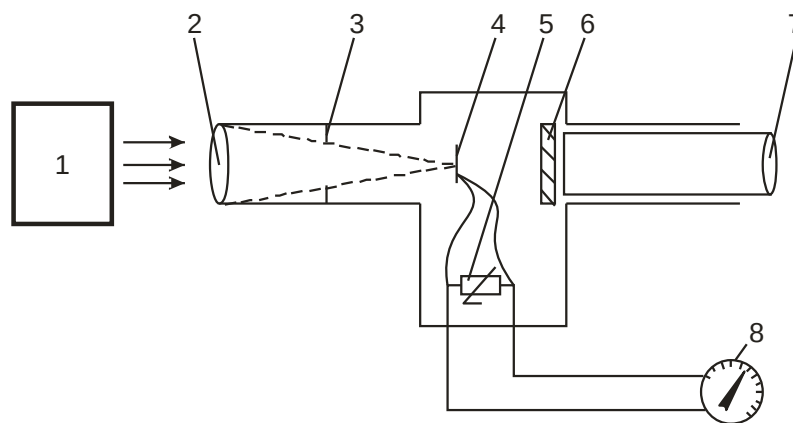


Рисунок 2.9 – Схема радиационного пирометра рефракторного типа

Излучение от объекта 1 концентрируется линзой 2 объектива через диафрагму 3 на рабочих концах термобатарей 4. Фокусировка телескопа пирометра на объект измерения производится окуляром 7. При высокой температуре объекта для защиты глаз перед окуляром в поле зрения вводят красное стекло 6. Катушка 5, выполненная из медной и никелевой проволоки, служит для компенсации влияния изменения температуры свободных концов термобатарей. Метод компенсации заключается в том, что, например, при увеличении температуры свободных концов термо-ЭДС термобатарей уменьшается, а сопротивление меди увеличивается и ток, ответвляющийся в измерительный прибор 8, сохраняется практически постоянным.

При измерениях оптимальным расстоянием между телескопом и измеряемым телом считается $1 \pm 0,3$ м.

Наиболее удобными конструкциями в настоящее время являются портативные переносные и стационарные пирометры, разработанные и откалиброванные для измерения температур в различных отраслях промышленности.

Принцип их действия: оптическая система пирометра, наведенная на выбранный для измерения объект, фокусирует излучаемую или инфракрасную энергию на один или несколько фоточувствительных детекторов. Детектор конвертирует инфракрасную энергию в электрический сигнал, который обрабатывается микропроцессором и пересчитывается в значение температуры на основе калибровочных характеристик и коэффициента излучения датчика. Это значение температуры может выводиться на цифровой дисплей пирометра или быть представлено в виде аналогового сигнала, или, в случае интеллектуального датчика, конвертироваться в цифровой выходной сигнал и с использованием прикладного программного обеспечения отображаться на дисплее компьютера.

Тепловизоры. Тепловизор – это средство измерений температуры по тепловому излучению объекта, предназначенное для определения значения температуры и преобразования её в визуальную картину (термограмму) распределения тепловых полей по поверхности объекта в реальном времени.

Тепловое излучение от исследуемого объекта через оптическую систему тепловизора передается на приемник, представляющий собой неохлаждаемую матрицу ячеек (термоэлектрических детекторов), которая преобразует тепловое излучение в видеосигнал. Видеосигнал оцифровывается и отображается на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) тепловизора.

Тепловизор позволяет получить обобщенную информацию - тепловую картину некоторой области и конкретное значение температуры интересующего объекта, размер которого равен или больше поля зрения одной из ячеек матрицы тепловизора.

С помощью внутренней микропроцессорной системы возможна различная обработка полученного изображения и отображение термограмм на ЖКИ в различных цветовых палитрах.

В настоящее время тепловизоры находят широкое применение в промышленности как одно из наиболее мощных средств бесконтактного измерения температуры и технической диагностики.

Области применения: энергетика и энергоаудит, экспертиза и сертификация промышленных объектов на соответствие требованиям безопасности, нефтяная и химическая промышленность, строительство, машиностроение, системы охраны и пожарной безопасности.

Раздел III. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Тема 3.1. Магнитоэлектрические и цифровые милливольтметры. Потенциометры. Нормирующие преобразователи

Милливольтметры. Магнитоэлектрический милливольтметр. Принцип его действия основан на использовании сил взаимодействия между постоянным током, протекающим по проводнику (обмотке подвижной рамки) с магнитным полем находящегося в приборе постоянного неподвижного магнита.

Милливольтметр состоит из следующих основных деталей: подковообразного постоянного магнита, снабженного полюсными наконечниками с цилиндрической выточкой, между которыми неподвижно укреплен цилиндрический сердечник, подвижной прямоугольной рамки, состоящей из нескольких сот последовательных витков изолированной проволоки; две боковые (активные) стороны этой рамки расположены в кольцевом воздушном зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником; стрелки, жестко скрепленной с рамкой, образующих вместе подвижную систему прибора, которая может быть выполнена на кернах или на растяжках. На рисунке 3.1 приведена подвижная часть милливольтметра на растяжках. Эта подвижная часть устанавливается в воздушном зазоре магнитопровода. Растяжки, изготовленные из бериллиевой бронзы и других сплавов, имеют форму плоских лент с большим отношением сторон (ширина 0,1 – 0,3 мм, толщина 0,01 – 0,025 мм). Они служат для подвода и отвода тока обмотки рамки и одновременно создают противодействующий момент.

Во избежание изменений направления лент растяжек при колебаниях температуры и для увеличения эластичности в аксиальном и радиальном направлениях они припаиваются со стороны обоймы к пружинкам. Со стороны рамки растяжки крепятся в буксах, прикрепляемых непосредственно к рамке.

На рисунке 3.2 показана схема измерения термо-э.д.с. магнитоэлектрическим милливольтметром.

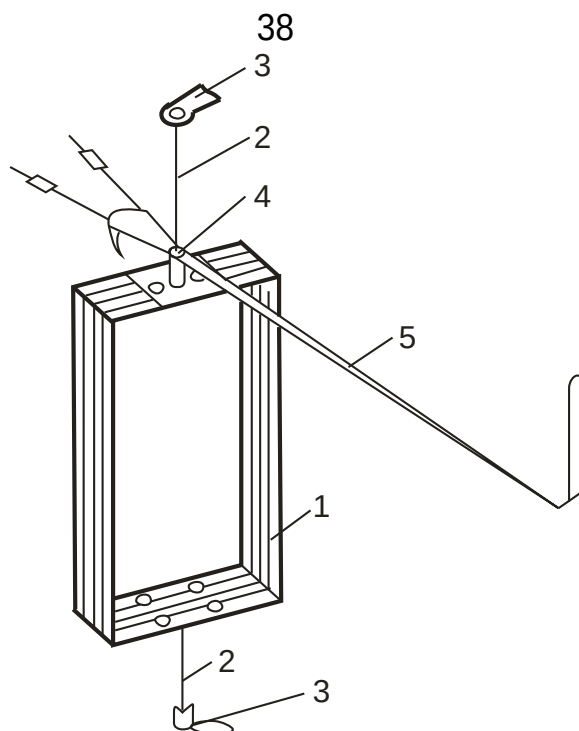


Рисунок 3.1 – Подвижная часть (рамка) милливольтметра на растяжках
1 – рамка; 2 – растяжки; 3 – пружины; 4 – букса; 5 – стрелка.

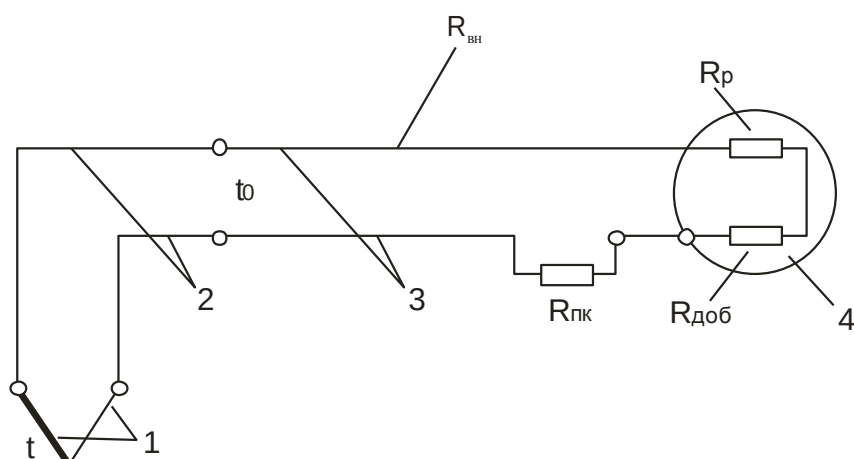


Рисунок 3.2 – Схема измерения термо-ЭДС магнитоэлектрическим вольтметром
1 – термоэлектрический термометр; 2 – компенсационные провода;
3 – соединительные провода; 4 – милливольтметр

Рамка под действием силы термотока i поворачивается до тех пор, пока магнитоэлектрический момент не станет равным противодействующему. Таким образом угол поворота рамки φ пропорционален силе тока, развиваемой термопарой:

$$\varphi = k i, \quad (3.1)$$

Общее сопротивление измерительной цепи R складывается из сопротивлений милливольтметра R_M и внешней соединительной линии $R_{вн}$, которая включает и сопротивление термоэлектрического термометра: $R = R_M + R_{вн}$

Если бы сумма сопротивлений $R_M + R_{вн}$ была величиной постоянной, то между углом поворота рамки φ , т.е. показаниями милливольтметра и измеряемой ЭДС термометра была бы однозначная зависимость и шкалу милливольтметра можно было градуировать в градусах для конкретного термометра. Однако сопротивления внешней линии и милливольтметра изменяются в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к погрешности измерения.

Сопротивление милливольтметра R_M складывается из сопротивлений рамки R_p и добавочного сопротивления $R_{доб}$:

$$R_M = R_p + R_{доб}.$$

Добавочное сопротивление $R_{доб}$, выполненное из манганина, температурный коэффициент электрического сопротивления которого близок к нулю ($0,6 \cdot 10^{-5}$ на 1°C), служит для подгонки заданного диапазона показаний и уменьшения влияния на прибор колебаний температуры окружающего воздуха.

Сопротивление внешней соединительной линии, при котором производилась градуировка шкалы милливольтметра, указано на шкале. Если при проведении измерений сопротивление соединительной линии окажется меньше указанного значения, то недостающее сопротивление устанавливают на подгоночном резисторе $R_{пк}$.

Для снижения влияния на точность показаний прибора колебаний температуры окружающего воздуха стремятся к уменьшению отношений $R_{вн}/R_M$ и R_p/R_M . Уменьшение отношения $R_{вн}/R_M$ возможно за счет увеличения сопротивления милливольтметра R_M . Так как рамка милливольтметра выполнена из медного провода с сопротивлением r (которое не велико), то общее сопротивление увеличивают за счет добавочного сопротивления $R_{доб}$, выполненного в виде манганиновой катушки. Обычно в промышленных милливольтметрах $R_M = 100 \div 500$ Ом, а отношение $R_p/R_M \leq 1/3$.

Милливольтметры по конструктивному исполнению бывают переносными и стационарными (щитовыми). Стационарные милливольтметры имеют только градусную шкалу, выпускаются показывающими и самопишущими. Переносные милливольтметры имеют две шкалы (градусную и милливольттовую) или одну милливольттовую. Эти приборы выполняют как показывающие.

Цифровые милливольтметры. Цифровой милливольтметр по сравнению с аналоговым магнитоэлектрическим имеет ряд преимуществ: малые габариты, автоматический процесс измерения, упрощенная процедура адаптации к любому типу подключаемой термопары, отсутствие дополнительной погрешности, вызванной изменением температуры окружающей среды. На рисунке 3.3. приведена типовая схема цифрового милливольтметра. Милливольттовый сигнал от термопар поступает на вход фильтра, который отфильтровывает помехи промышленной частоты. Далее в блоке БАК осуществляется ввод поправки на температуру холодного спая. Напряжение разбаланса с БАК поступает на входной усилитель с коэффициентом усиления $200 \div 500$ и далее АЦП с тактовой частотой до 100 Гц, где осуществляется преобразование аналогового сигнала в цифровой. В ПЗУ хранятся характеристики различных типов термоэлектрических термометров

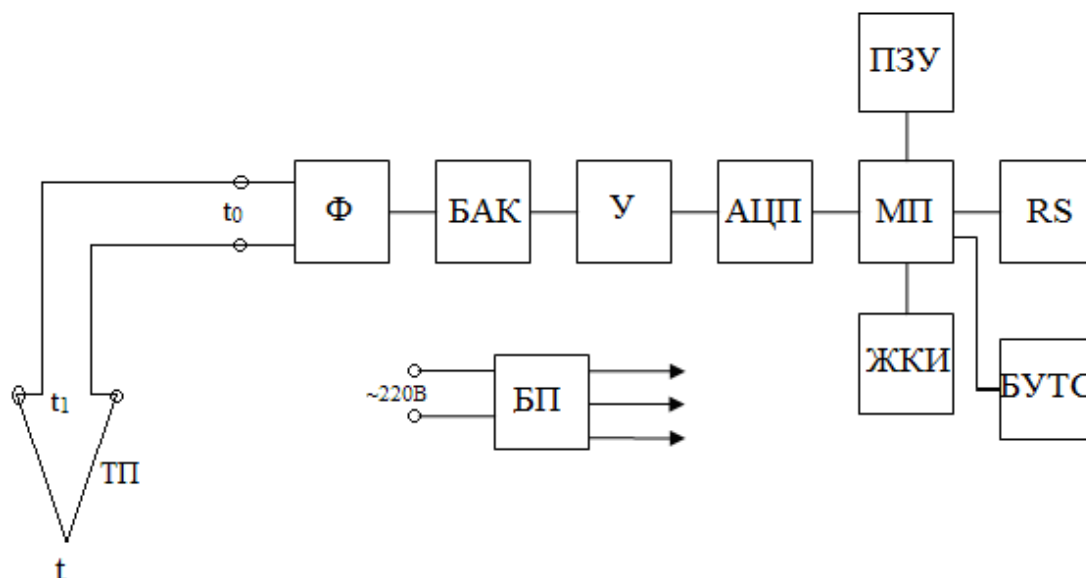


Рисунок 3.3 – Структурная схема цифрового милливольтметра: ТП – термопара; Ф – фильтр; БАК – блок автоматической компенсации изменения температуры холодного спая; У – входной усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; БУТС – блок формирования унифицированного токового сигнала (0 – 5 мА, 4 – 20 мА); RS – протокол цифрового выхода (RS – 232; RS – 485)

Потенциометры. Потенциометры являются наиболее совершенными вторичными приборами для работы с термоэлектрическими термометрами. Принцип действия потенциометров основан на компенсационном методе измерения термо-э.д.с., который заключается в уравнивании (компенсации) измеряемой неизвестной э.д.с. известным напряжением, получаемым от строго определенного тока, называемого рабочим, на сопротивлении с известным значением. Сила тока в момент измерения в компенсационной цепи поддерживается постоянной.

На рисунке 3.4. представлена схема потенциометра, поясняющая принцип его работы, состоящая из трех контуров: I контур - измерительная цепь, II контур - цепь нормального элемента; III контур - цепь термоэлектрического термометра Т.

Каждая цепь имеет свой источник напряжения: измерительная - аккумуляторную батарею E_6 ; цепь нормального элемента (эталон напряжения $E_{нэ}=1.0186\text{В}$); цепь термоэлектрического термометра - термо-э.д.с., развиваемую термометром.

Напряжение, а, следовательно, и сила тока аккумуляторной батареи E_6 постепенно падает, поэтому периодически необходимо производить стандартизацию тока I_6 . Для этой цели служит цепь нормального элемента, включающая контрольный резистор R_k из манганина, имеющий постоянное и точно известное сопротивление. Переключатель “П” устанавливают в положение “К”. Ток в измерительной цепи регулируется резистором R_6 до тех пор, пока

падение напряжения на R_k не будет равно э.д.с. нормального элемента $E_{нэ}$. При выполнении этого условия стрелка нулевого прибора устанавливается на нулевой отметке шкалы, и имеет место равенство:

$$E_{нэ} = IR_k; \quad (3.2)$$

$$\text{Таким образом: } I = E_{нэ} / R_k; \quad (3.3)$$

После этого переключатель “П” устанавливают в положение “И” и перемещают движок “С” на реохорде R_p до тех пор, пока указатель нуля-прибора опять не установится на нулевой отметке. Это произойдет в момент компенсации э.д.с. развиваемой термоэлектрическим термометром $E(t, t_0)$ падением напряжения на участке реохорда R_0 :

$$E(t, t_0) = I_m R_p; \quad (3.4)$$

или

$$E(t, t_0) = \frac{E_{нэ}}{R_k} m R_p, \quad (3.5)$$

где $m = R_0 / R_p$, где R_0 - часть сопротивления реохорда R_p левее движка “С”.

Так как измерение термо-э.д.с. термоэлектрического термометра производят в момент отсутствия в цепи тока, то нет и падения напряжения и показания потенциометра не зависят от изменения сопротивления соединительных проводов и термометра. Это является существенным преимуществом потенциометров перед милливольтметрами. Таким образом, к основным достоинствам потенциометрического метода относится высокая точность измерения, которая обеспечивается за счет:

- -отсутствия влияния изменения температуры окружающего воздуха на сопротивление прибора и внешней соединительной линии;
- -простоты автоматического введения поправки на изменение температуры свободных концов термометра.

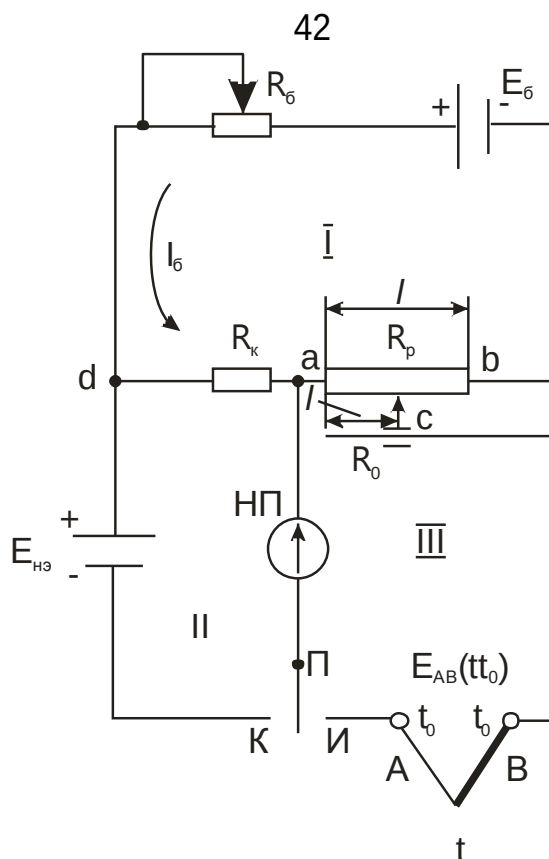


Рисунок 3.4 – Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

Промышленностью выпускаются потенциометры переносные и автоматические. Автоматические потенциометры конструктивно, а также по дополнительно выполняемым функциям имеют ряд модификаций. Различают полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные автоматические потенциометры с шириной диаграммной ленты 250, 160 и 100 мм. Автоматические потенциометры выпускаются в виде показывающих, одно- и многоточечных. В них могут встраиваться регулирующие и сигнализирующие устройства, а также устройства для передачи показаний на расстояние с помощью токовых.

На рисунке 3.5. приведена принципиальная схема автоматического самопишущего потенциометра типа КСП.

Перемещение контакта R_p происходит автоматически. При нарушении разбаланса схемы от изменения термо-ЭДС термоэлектрического преобразователя. Напряжение между точками A' и A'' определяет диапазон измерений прибора.

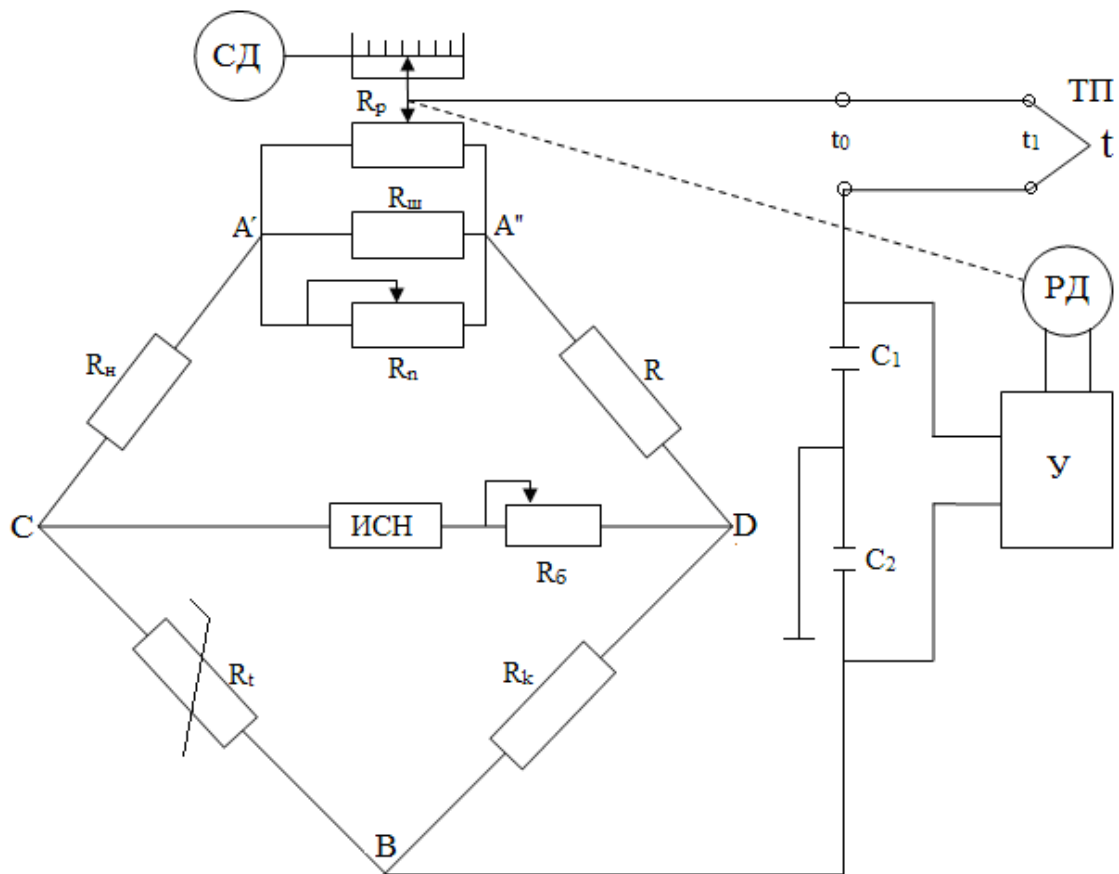


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема автоматического самопишущего потенциометра типа КСП.

R_p – регулирующий резистор; $R_{ш}$ – сопротивление шунта; R_n – сопротивление для регулирования начала шкалы; R_n – сопротивление для регулирования предела шкалы; $R_б$ – балластное сопротивление; R_t – медное термосопротивление; R_k – контрольное сопротивление; R – постоянное сопротивление; ИСН – источник стабилизированного напряжения; У – усилитель; РД – реверсивный двигатель; ТП – термопара; СД – синхронный двигатель; C_1 , C_2 – фильтр промышленной частоты.

На рисунке 3.6. приведена принципиальная схема автоматического самопишущего потенциометра типа РП-160.

Основным элементом данной схемы является реохорд R_p . На него подается стабилизированное напряжение 1 В. На суммирующий усилитель СУ подается разность выходного напряжения входного усилителя $V_xУ$ и, напряжение с участка реохорда правее движка. Усиленный сигнал разбаланса поступает на пусковую схему СУД шагового двигателя, которая определяет направление вращения двигателя и его скорость. Шаговый двигатель перемещает движок реохорда до такого положения, при котором напряжение с входного усилителя и реохорда сравниваются. С движком реохорда жестко скреплена стрелка, указывающая значение измеряемой температуры. Терморезистор R_t здесь служит для компенсации изменения термо-ЭДС при изменении температуры свободных концов.

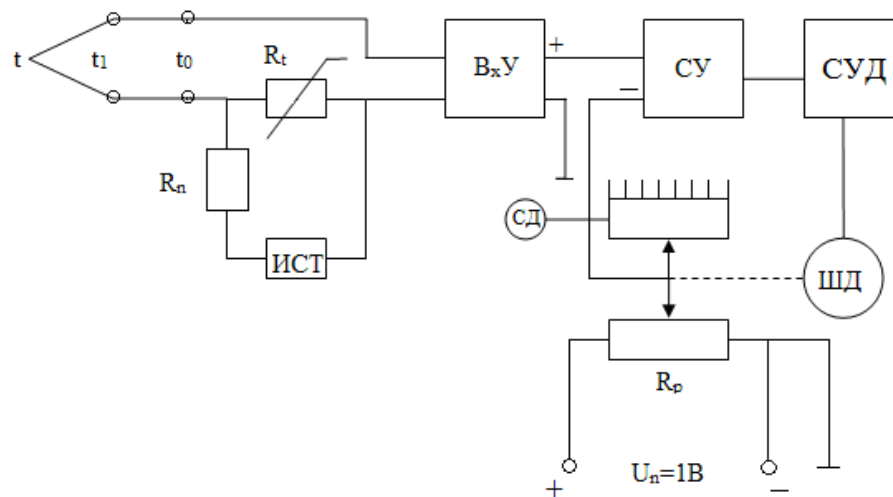


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема автоматического самопишущего потенциометра типа РП-160: ТП – термопара; ВхУ – входной усилитель; СУ – суммирующее устройство; СУД – система управления двигателем; ШД – шаговый двигатель; СД – синхронный двигатель; R_p – переменное сопротивление; R_t – термометр сопротивления медный; ИСТ – источник стабилизированного тока.

Нормирующие преобразователи предназначены для введения информации, получаемой от термометра, в компьютер или в систему автоматического регулирования используют нормирующие токовые преобразователи, которые формируют на выходе сигнал постоянного тока 0-5 мА, 0-20 мА и 4-20 мА.

Нормирующие преобразователи термо-ЭДС. В основу работы нормирующего преобразователя положен компенсационный метод измерения термо-ЭДС с использованием схемы потенциометра с переменной силой рабочего тока. Схема преобразователя приведена на рисунке 3.7.

На схеме контур компенсации I содержит корректирующий мост КМ, усилитель U_1 с токовым выходом $I_{\text{вых}}$ и резистор $R_{\text{вн}}$, а также термоэлектрический термометр, подключенный к этому контуру с помощью удлинительных проводов F и D. Корректирующий мост КМ предназначен для введения автоматической поправки на изменение температуры свободного конца термометра. К диагонали “ab” питания моста подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Резисторы R_1, R_2 и R_3 выполнены из манганина, а резистор R_m - из медного провода. Усилитель U_1 выполняет функции нуля-индикатора и состоит из двух каскадов: магнитного УМ, выполненного по двухтактной двухполупериодной схеме, и полупроводникового усилителя УП, работающего в режиме усиления постоянного тока.

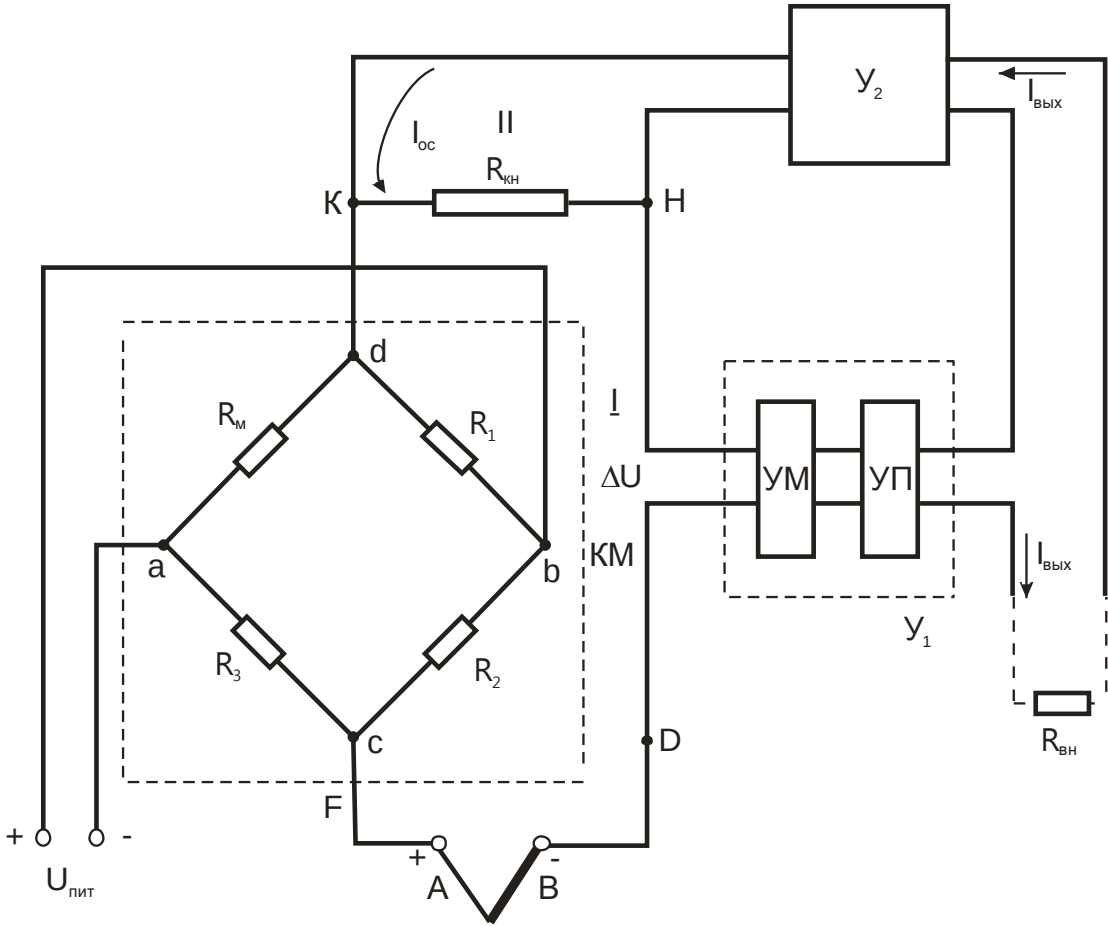


Рисунок 3.7 – Схема нормирующего преобразователя, работающего в комплекте с термоэлектрическим преобразователем

Контур компенсации II включает в себя резистор R_{KH} и усилитель обратной связи U_2 . Этот усилитель аналогичен усилителю U_1 , но включен с глубокой отрицательной обратной связью по выходному току I_{oc} усилителя. Выходной ток I_{oc} усилителя U_2 является рабочим током контура II и при прохождении его по сопротивлению R_{KH} на нем со стороны контура II создается компенсирующее напряжение:

$$U_{KH} = I_{OC} R_{KH}. \quad (3.6)$$

Со стороны контура I к резистору $R_{\text{кн}}$ подводится сигнал термоэлектрического термометра $E_{\text{ав}}(t, t_0)$, сложенный с напряжением V_{cd} , создаваемым в измерительной диагонали "cd" корректирующего моста КМ. Как известно, это напряжение равно поправке на температуру свободных концов термометра, т.е.:

$$U_{cd} = E_{ab}(t_0^-, t_0); \quad (3.7)$$

Этот суммарный сигнал, равный: $E_{ав}(t, t_0) = E_{ав}(t, t_0) + U_{cd}$ сравнивается с напряжением $U_{кн}$. Небаланс, равный $\Delta U = E_{ав}(t, t_0) - U_{кн}$ подается на усилитель $У_1$, где этот сигнал преобразуется сначала в магнитном усилителе УМ в сигнал переменного тока, затем усиливается и опять преобразуется в сигнал

постоянного тока, который дополнительно усиливается в полупроводниковом усилителе УП постоянного тока.

Выходной сигнал усилителя Y_1 создает ток $I_{\text{вых}}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{\text{вн}}$ и далее через делитель - в усилитель обратной связи Y_2 . Выходной ток $I_{\text{ос}}$ усилителя Y_2 изменяется и изменяет падение напряжения $U_{\text{кн}}$ на резисторе $R_{\text{кн}}$ до тех пор, пока небаланс ΔU не достигнет некоторой малой величины δU , которую называют статической ошибкой компенсации.

Исключить эту ошибку в устройствах, выполненных по статической автокомпенсационной схеме, принципиально невозможно, так как выходной ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ и ток контура компенсации $I_{\text{ос}}$ определяется наличием этой ошибки и пропорционален ей. Но эта ошибка может быть значительно уменьшена, если использовать усилитель с большим коэффициентом усиления. Установим математическую связь между измеряемой термо-эдс $E_{\text{ав}}(t, t_0)$ и выходным током $I_{\text{вых}}$.

В соответствии с приведенным выше

$$\Delta U = \Sigma_{\text{ав}}(t, t_0) - U_{\text{кн}}; \quad (3.8)$$

на выходах усилителей Y_1 и Y_2 формируются сигналы

$$I_{\text{вых}} = K_1 I_{\text{вх}} = K_1 \frac{\Delta U}{R_{\text{вх}}}; \quad (3.9)$$

$$I_{\text{ос}} = K_2 I_{\text{вых}}, \quad (3.10)$$

где K_1 и K_2 - соответственно коэффициенты усиления Y_1 и Y_2 ;

$I_{\text{в}} = \Delta U / R_{\text{вх}}$ - ток создаваемый во входной цепи усилителя сигналом ΔU ;
 $R_{\text{вх}}$ - сопротивление входной цепи усилителя Y_1 .

Падение напряжения на резисторе $R_{\text{кн}}$ с учетом (3.10) составит:

$$U_{\text{кн}} = I_{\text{ос}} R_{\text{кн}} = K_2 I_{\text{вых}} R_{\text{кн}}. \quad (3.11)$$

Подставив в выражение (3.18) ΔU из (3.17) и $U_{\text{кн}}$ из (3.15), получим

$$I_{\text{вых}} = K E_{\text{ав}}(t, t_0), \quad (3.12)$$

где $K = \frac{1}{R_{\text{вх}}/K_1 + R_{\text{кн}} \cdot K_2}$ - коэффициент преобразования нормирующего преобразователя.

Таким образом, выходной токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален откорректированному по температуре свободных концов сигналу термоэлектрического термометра.

Нормирующие преобразователи термометров сопротивления. Схема такого нормирующего преобразователя приведена на рисунке 3.8. Как видно из рисунка по схеме и принципу действия он аналогичен нормирующему преобразователю, работающему в комплекте с термоэлектрическим термометром

(смотри рисунок 3.7) Основные отличия указанных схем заключаются в том, что в преобразователе рис.3.15 вместо корректирующего моста КМ используется измерительный мост ИМ, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме подсоединен термометр сопротивления R_t . Остальные сопротивления выполнены из манганина. Сопротивления R_L служат для подгонки сопротивления соединительных проводов к номинальному значению. К диагонали питания моста "ab" подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Выходной ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ пропорционален напряжению U_{cd} в измерительной диагонали моста, и соотношение между ними может быть представлено следующим образом:

$$I_{\text{вых}} = KU_{\text{cd}}, \quad (3.13)$$

а так как

$$U_{\text{cd}} = K_M R_t, \quad (3.14)$$

где K_M - коэффициент преобразования моста, то

$$I_{\text{вых}} = KK_M R_t. \quad (3.15)$$

Таким образом, токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален сопротивлению термометра сопротивления.

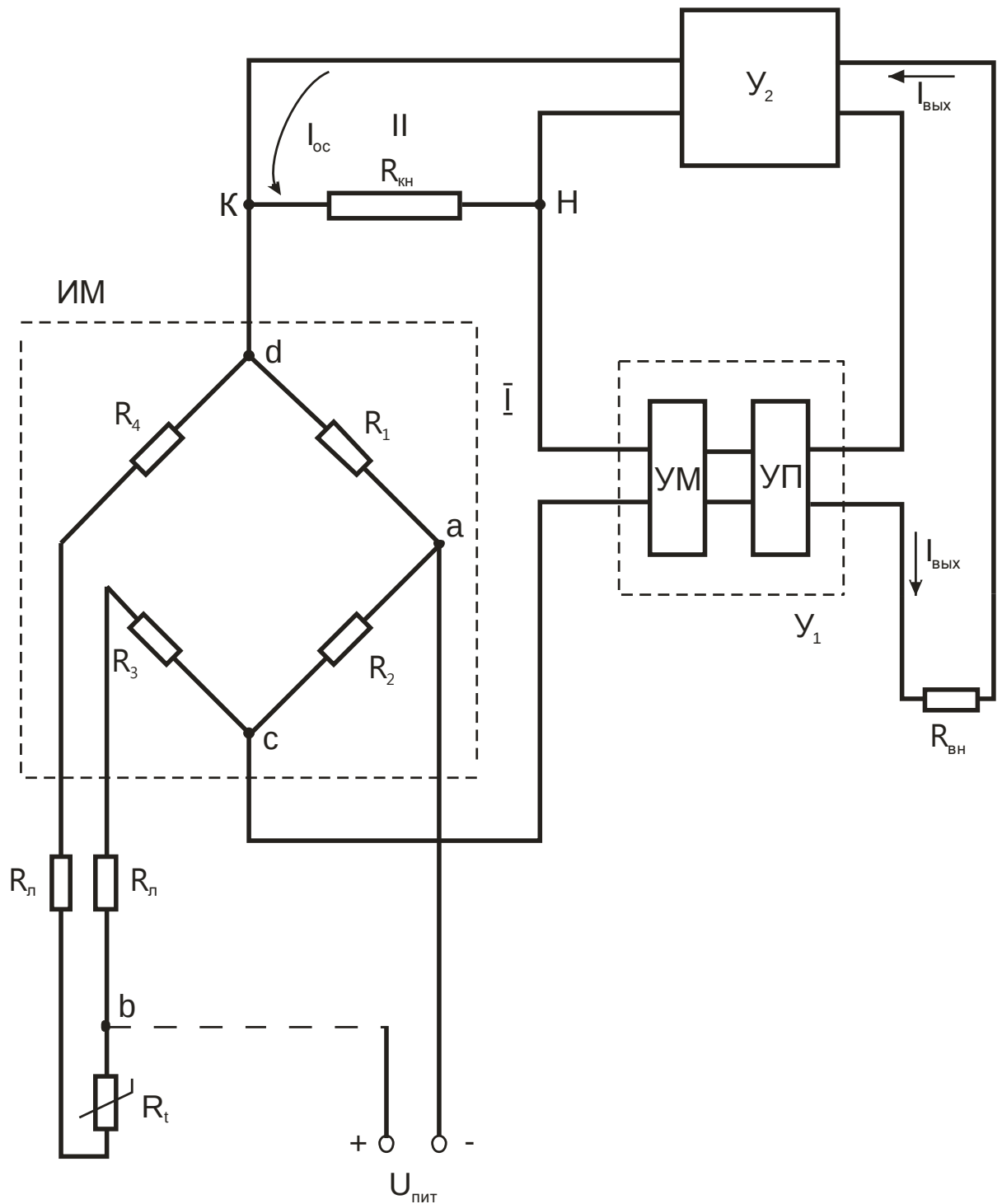


Рисунок 3.8 – Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления

Тема 3.2. Мосты уравновешенные. Неуравновешенный мост. Логометры

Уравновешенные мосты. В практике измерений температуры с использованием термометров сопротивлений широкое применение нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры.

Уравновешенные мосты подразделяют на неавтоматические и автоматические. В них, как и в потенциометрах, используется нулевой метод измерений.

Простейшая двухпроводная схема уравновешенного моста представлена на рисунке 3.9. Диагональ питания моста “ab” содержит источник тока E_6 , а диагональ измерения “cd” - чувствительный магнитоэлектрический гальванометр НИ (нуль - индикатор). Между точками подключения разноименных диагоналей располагаются плечи моста, состоящие из постоянных резисторов R_1 и R_2 и регулируемого R_3 , плечо “cb” содержит измеряемое сопротивление R_t (термометр сопротивления) и два соединительных провода каждый сопротивлением $R_{л1}$ и $R_{л2}$. Если мост уравновешен, то ток $I_{НИ}$ в диагонали “cd” равен нулю, а токи в соответствующих плечах равны, т.е.:

$$I_2 = I_3, \text{ а } I_1 = I_t. \quad (3.16)$$

Таким образом можно записать, что

$$I_2 R_2 = I_1 R_1 \quad \text{и} \quad I_3 R_3 = I_t (R_t + R_{л1} + R_{л2}). \quad (3.17)$$

Разделив эти равенства друг на друга, с учетом равенства токов (3.1) имеем:

$$R_2 (R_t + R_{л1} + R_{л2}) = R_1 R_3. \quad (3.18)$$

Данное выражение, полученное на основании равенства тока $I_{НИ}$ нулю, определяет условие равновесия моста: чтобы мост находился в равновесии, необходимо соблюсти равенство произведений сопротивлений противоположных его плеч. Это достигается путем регулирования сопротивления резистора R_3 до тех пор, пока стрелка нуль - гальванометра не остановится на нулевом значении.

Из (3.18) следует, что неизвестное сопротивление R_t может быть определено по значению R_3 при постоянном отношении плеч R_1/R_2 и при неизменных значениях $R_{л1}$ и $R_{л2}$. Однако сопротивления внешних линий $R_{л1}$ и $R_{л2}$ будут изменяться с изменением температуры окружающей среды и это будет приводить к искажению результата в тем большей степени, чем меньше значение R_t . Данный недостаток может быть устранен путем применения трехпроводной схемы подсоединения термометра сопротивления к мосту (рисунок 3.10). При таком соединении питающая диагональ доводится до термометра сопротивления и соединительные провода оказываются разнесенными к двум плечам моста. Тогда условие равновесия моста примет вид :

$$R_1 (R_3 + R_{л1}) = R_2 (R_t + R_{л2}), \quad (3.19)$$

откуда

$$R_t = (R_1/R_2)(R_3 + R_{л1}) - R_{л2}. \quad (3.20)$$

В таком случае, если мост выполнить симметричным ($R_1=R_2$), то будем иметь $R_t = R_3$, т.е. результат измерения R_t в данном случае не зависит от сопротивления соединительных проводов $R_{л1}$ и $R_{л2}$.

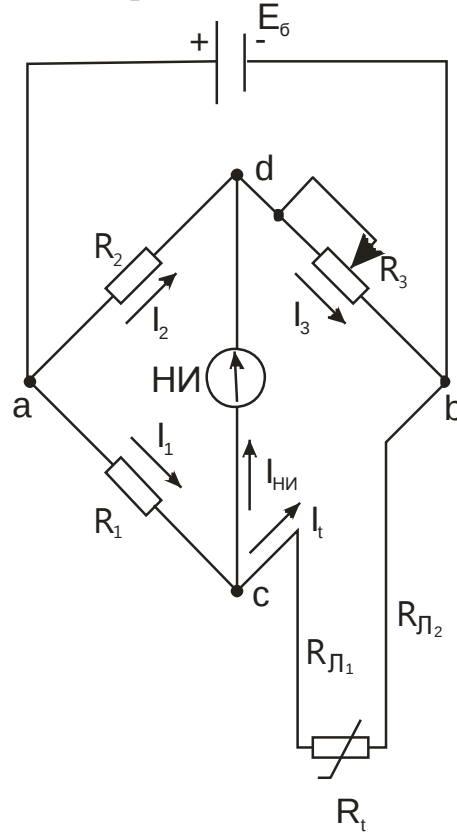


Рисунок 3.9 – Схема уравновешенного моста

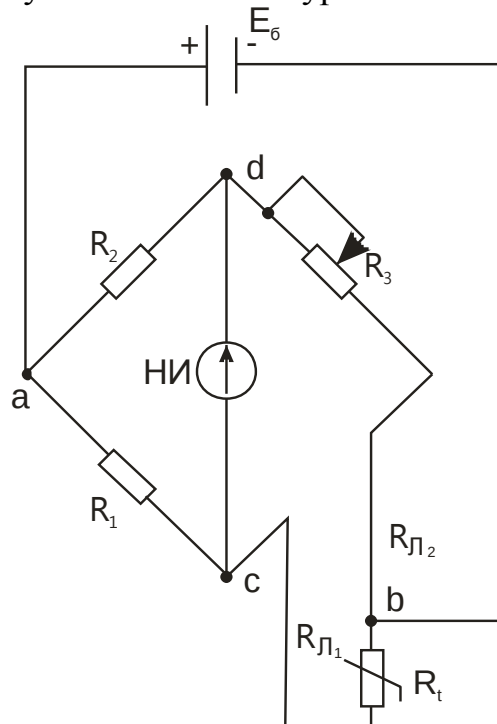


Рисунок 3.10 – Трехпроводная схема соединения термопреобразователя сопротивления с мостом

Кроме двух- и трехпроводных схем подключения термосопротивления также используется и четырехпроводная схема. В четырехпроводной схеме питания термосопротивления производится с помощью одних проводов, а измерения разности потенциалов на термосопротивлении – с помощью других. В этом случае влияние сопротивления всех проводов полностью исключается.

Достоинством уравновешенных мостов является независимость их от напряжения питания.

Выпускаемые в настоящее время автоматические уравновешенные мосты отличаются друг от друга назначением, конструкцией, размерами, точностью измерения и другими техническими характеристиками, например, мосты одно- и многоточечные; самопишущие и показывающие с ленточной, а также дисковой диаграммой; полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные с шириной диаграммной ленты соответственно 250, 160, 100 мм.

На рисунке 3.11 приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста тип КСМ

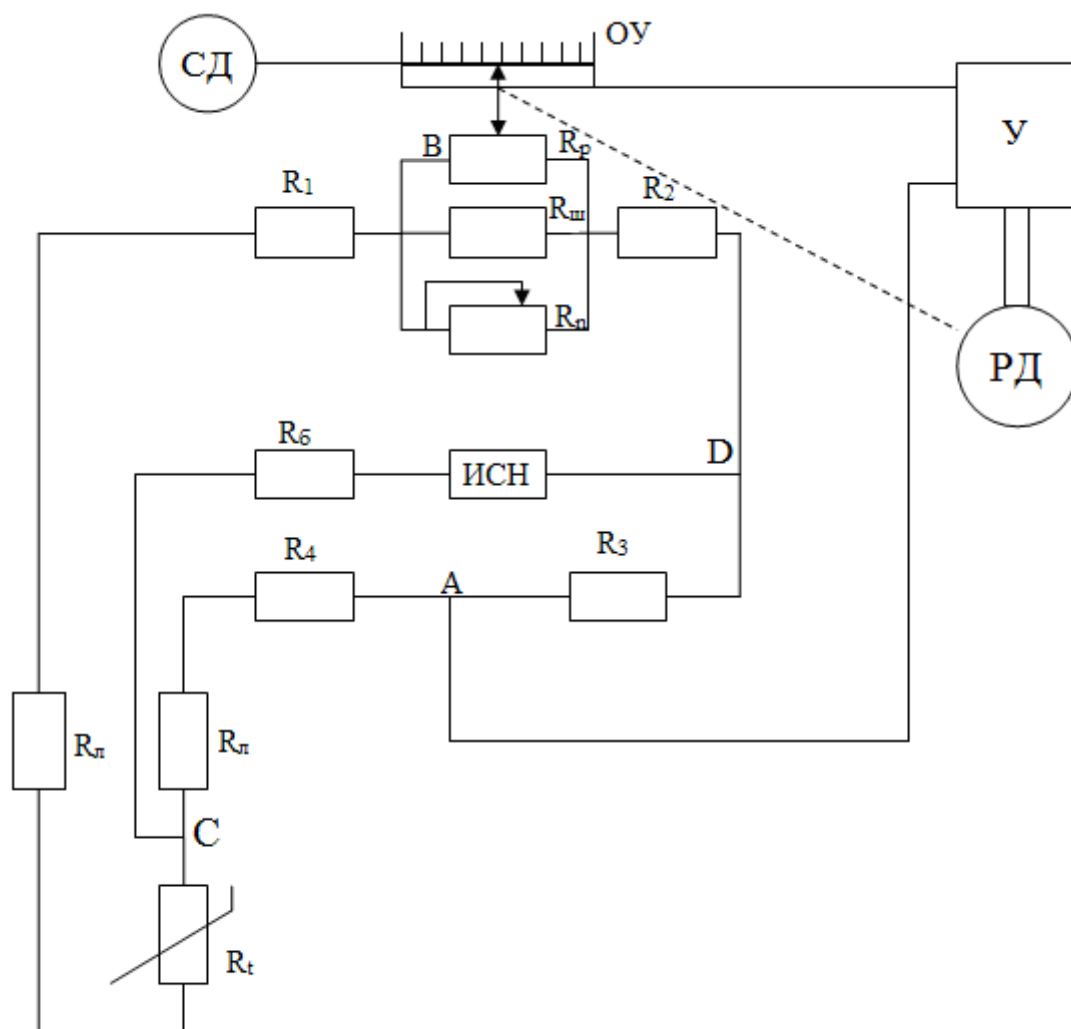


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста типа КСМ: R_p – реохорд; $R_{ш}$ – сопротивление шунта; $R_{п}$ – переменное сопротивление для корректировки предела измерения; R_6 – балластное сопротивление; $R_{л}$ – сопротивление линии; R_1, R_2, R_3, R_4 – постоянные сопротивления; R_t – термосопротивление; ИСН – источник стабилизированного

напряжения; У – усилитель; РД – реверсивный двигатель; ОУ – отчетное устройство; СД – синхронный двигатель.

Здесь термометр подключен к автоматическому мосту по трехпроводной схеме. При изменении температуры нарушается равновесие моста. В измерительной диагонали появляется напряжение, которое подается на усилитель и затем приводит в движение реверсивный двигатель РД. Электродвигатель перемещает каретку ОУ с расположенным на ней токосъемным движком реохорда R_p , указателем и пером до момента достижения равновесия моста.

Неуравновешенные мосты. В схеме неуравновешенного моста в диагональ вместо нуля - гальванометра включается миллиамперметр. Значение тока I_m в диагонали является мерой подсоединенного к мосту измеряемого сопротивления R_t . Неуравновешенные мосты относительно редко используются для измерения температур из-за невысокой точности измерения. Они широко применяются в различных газоанализаторах, где в качестве чувствительного элемента используются нагреваемые электрическим током металлические или полупроводниковые резисторы, в нормирующих преобразователях, работающих с термометрами сопротивления. В неуравновешенном мосте (рисунок 3.12) сопротивления трех плеч R_1, R_2, R_3 - постоянны; R_6 - реостат в диагонали питания, служит для поддержания постоянного значения напряжения на вершинах “а и б”, П - переключатель с помощью которого к четвертому плечу подключается термометр сопротивления R_t (в положении И) или контрольное сопротивление R_k (в положении К). Значение тока I_m , проходящего через миллиамперметр, определяется через выражение

$$I_m = U_{ab} \frac{R_2 R_t - R_1 R_3}{k}, \quad (3.21)$$

где $K = f(R_1, R_2, R_3, R_t)$.

Из (3.21) следует, что если напряжение в диагонали моста питания U_{ab} постоянно, то ток в измерительной диагонали “cd” линейно зависит от R_t . Для контроля значения U_{ab} переключатель “П” из положения ”И” время от времени устанавливают в положение “К”. Если величина напряжения U_{ab} соответствует значению, принятому при градуировке прибора, т.е. ток I_m имеет вполне определенное значение, то стрелка миллиамперметра установится на контрольном значении шкалы, отмеченном цветной линией. В противном случае это достигается путем изменения сопротивления реостата R_6 . Применение вместо батарей постоянного тока стабилизированных источников питания (ИПС) позволяет исключить необходимость контрольных процедур проверки постоянства напряжения питания моста.

В последнее время широкое распространение получили цифровые неуравновешенные мосты. На рисунке 3.12 приведена структурная схема цифрового неуравновешенного моста

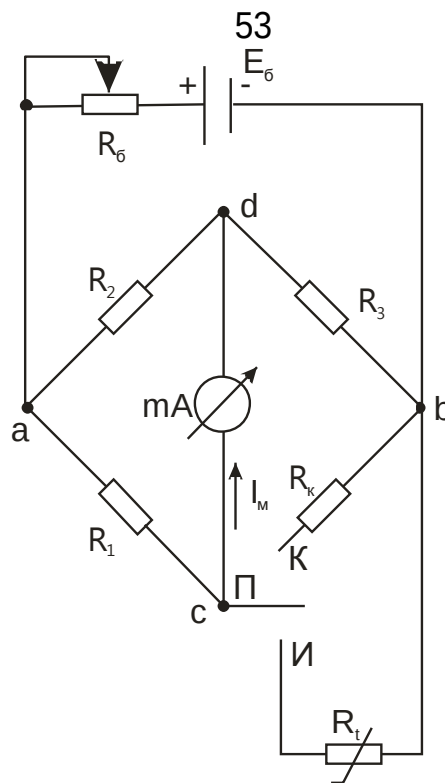


Рисунок 3.12 – Схема неуравновешенного моста

Логометры. Название прибора произошло от греческого слова “логос” - отношение. Логометры магнитоэлектрической системы (рисунок 3.13) используются в комплекте с термометрами сопротивления для измерения и записи температур. Логометры бывают показывающими, самопишущими, многоточечными и, кроме того, могут иметь встроенные устройства для сигнализации и регулирования температуры.

Подвижная часть логометра состоит из двух жестко скрепленных друг с другом рамок. Рамки охватывают неподвижный цилиндрический сердечник. В отличие от милливольтметра воздушный зазор между сердечником и полюсными наконечниками неравномерен и потому магнитное поле в зазоре распределяется также неравномерно. Магнитная индукция B будет максимальна в наиболее узком месте зазора и уменьшается по мере его расширения. Токи I_1 и I_2 , проходящие в рамках направлены так, что возникающие моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу и равны:

$$M_1 = c I_1 B_1; \quad M_2 = c I_2 B_2. \quad (3.22)$$

При достижении равновесия, т.е. равенства моментов ($M_1 = M_2$), стрелка зафиксирует на шкале значение измеренной температуры. При этом

$$c I_1 B_1 = c I_2 B_2; \quad (3.23)$$

$$I_2 / I_1 = B_1 / B_2 = \varphi. \quad (3.24)$$

Таким образом угол поворота подвижной системы φ (показание логометра) определяется отношением токов в контурах I и II.

Следовательно, дополнительным отличием логометра от милливольтметра является то, что здесь нет противодействующих повороту рамок пружин. Уравновешивание момента, действующего в одной из рамок происходит не механическим, а электрическим путем за счет изменения момента другой рамки. Для исключения погрешности измерения токоподводы рамок выполнены безмоментными, из тонкой золотой ленты или маломоментными - из бронзовой проволоки малого диаметра.

Изменение напряжения источника питания Б в определенных пределах не влияет на точность измерения, т.к. логометр измеряет отношение двух токов, генерируемых от общего источника.

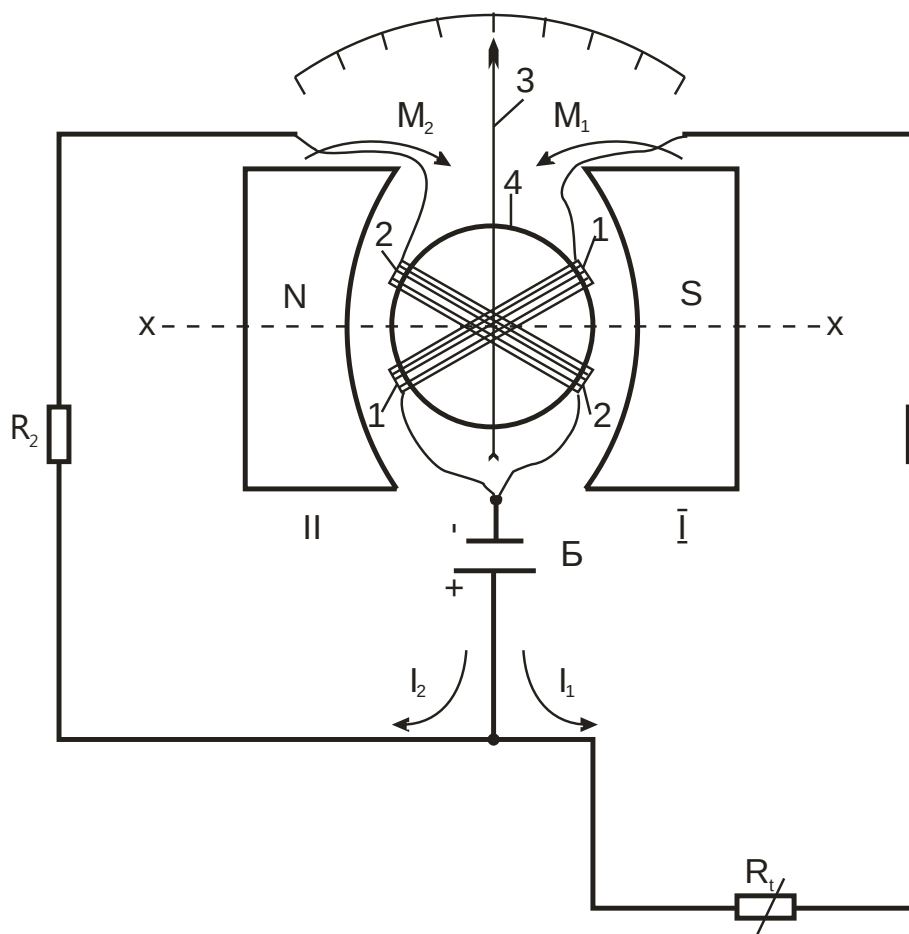


Рисунок 3.13 – Схема магнитоэлектрического логометра

Мостовая схема измерения сопротивления. Автоматический уравновешенный мост. Принципиальная электрическая схема. Неуравновешенный мост. Принципиальная электрическая схема. Двух- трех проводная схема измерения термосопротивления. Логометры. Принцип действия. Схема измерения. Погрешность измерения.

Тема 3.3. Цифровые мосты. Потенциометрические аналоговые регистраторы

На рисунке 3.14 приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста типа РП-160, работа которой основана на потенциометрическом методе измерения сопротивления (четырёхпроводная схема подключения)

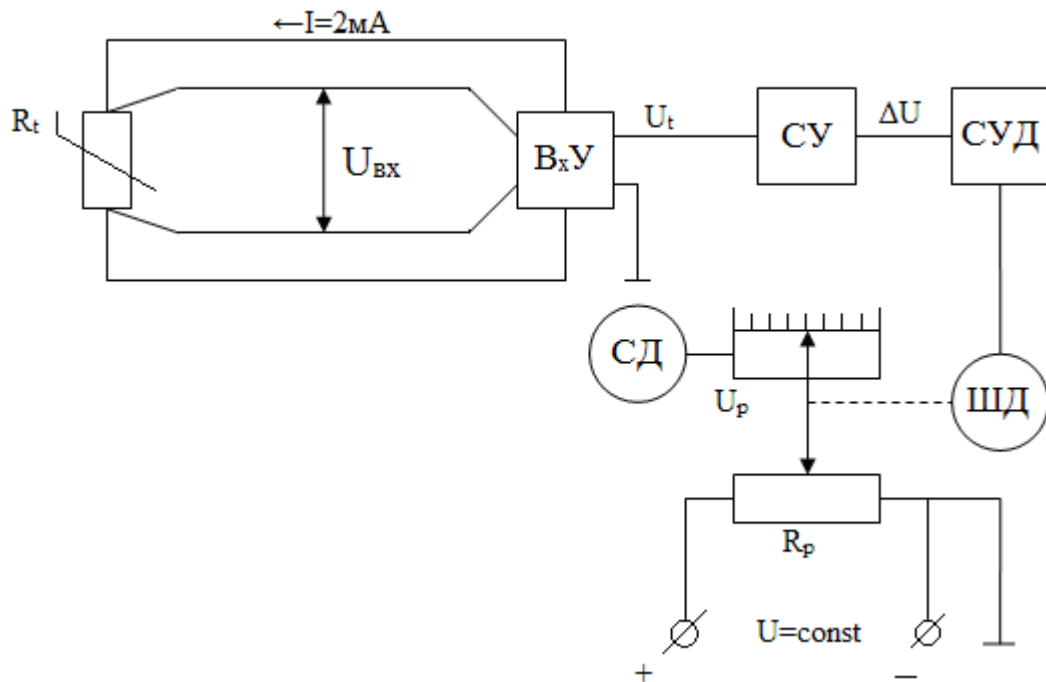


Рисунок 3.14 – Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста типа РП-160: R_t – термометр сопротивление; B_xY – входной усилитель; СУ – суммирующее устройство; СУД – система управления двигателем; ШД – шаговый двигатель; СД – синхронный двигатель; R_p – реохорд.

В основу работы данного прибора положен потенциометрический метод измерения термосопротивления. Здесь термометр сопротивления подключен по четырехпроводной схеме. По двум проводам подводится стабилизированный ток, по двум другим снимается напряжение $U_{вх}$ с R_t . Зная значения стабилизированного тока I и измерение падения напряжения $U_{вх}$, тем самым определяется R_t . В остальном работа данной схемы совпадает с работой схемы, приведенной на рисунке 3.6.

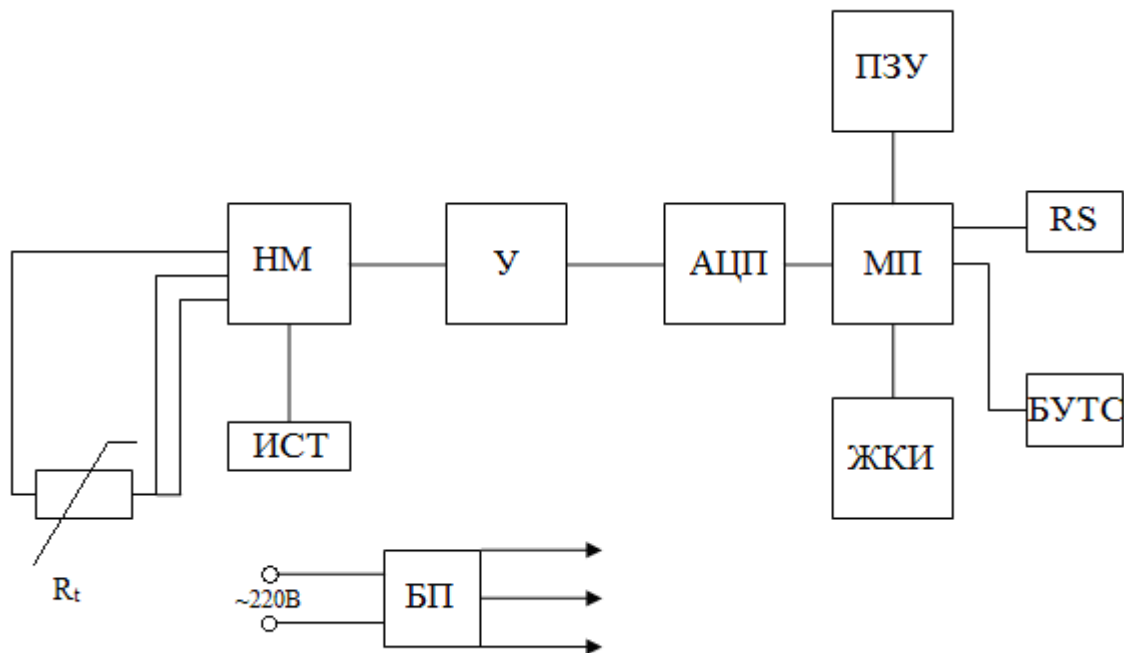


Рисунок 3.15 – Структурная схема цифрового неуравновешенного моста: R_t – термометр сопротивление; НМ – неуравновешенный мост; ИСТ – источник стабилизированного тока; У – входной усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; БУТС – блок формирования унифицированного токового сигнала (0 – 5 мА, 4 – 20 мА); RS – протокол цифрового выхода (RS – 232; RS – 485)

Термометр сопротивления подключен к одному из плеч неуравновешенного моста по трехпроводной схеме, которая питается от источника стабилизированного тока. На выходе моста формируется напряжение разбаланса на усилитель. В остальном принцип работы цифрового моста совпадает с работой цифрового милливольтметра.

Раздел IV. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ, РАСХОДА И УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

Тема 4.1. Измерение давления и разности давлений

Большое число средств измерения давления и разности давлений, различных по принципу действия, устройству, назначению и точности вызвано необходимостью измерения этого параметра в различных отраслях народного хозяйства.

Приборы, измеряющие давление и разрежение подразделяются на следующие основные группы:

➤ **манометры**, измеряющие избыточное давление (газа, пара, жидкости) более атмосферного;

- **вакуумметры**, измеряющие давление менее атмосферного;
- **мановакуумметры**, измеряющие давление менее атмосферного и избыточное;
- **тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры**, измеряющие небольшие разрежения и давления;
- **дифференциальные манометры**, измеряющие перепад или разность давлений.

По назначению приборы измерения давления и разрежения подразделяют на рабочие, контрольные и образцовые.

По виду чувствительного элемента их можно разделить на:

- **жидкостные**, в которых измеряемое давление или разрежение уравнивается высотой столба жидкости;
- **приборы с упругими чувствительными элементами**: а) мембранные, в которых измеряемое давление или разрежение уравнивается силой упругой деформации мембраны; б) пружинные и сильфонные, в которых измеряемое давление или разрежение уравнивается упругой деформацией пружины или сильфона;
- **тензопреобразовательные**, в которых измеряемый параметр деформирует пластину монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами, что в свою очередь изменяет электрическое сопротивление последних.

Более ограниченное применение имеют **приборы измерения давления**: электрические (емкостные, пьезоэлектрические сопротивления); ионизационные (электронные, магнитные электроразрядные, радиоизотопные); термокондуктометрические (терморезисторные, термоэлектрические) и другие.

По исполнению приборы давления и разрежения делятся на:

- **шкальные** - показывающие, самопишущие;
- **бесшкальные** - сигнализирующие и преобразующие.

Сигнализирующие приборы, в состав которых входят реле, принято называть **датчиками - реле давления (напора, тяги)**.

Приборы, преобразующие давление (разрежение) в выходной сигнал, называют преобразователями измерительными или просто **преобразователями давления**. В зависимости от выходного сигнала они делятся на **электрические** и **пневматические**.

В соответствии с международной системой СИ за единицу измерения давления принят паскаль - Па, который равен давлению, создаваемому силой в один ньютон (Н), на площадь 1 м^2 . На ТЭС находятся в эксплуатации приборы отградуированные в кгс/см^2 , кгс/м^2 , мм.рт.ст., мм.в.ст. В таблице 4.1 приведены соотношения между этими единицами.

Таблица 4.1. Соотношения между единицами давления

№	единица давления	Па	бар	кгс/см ²	кгс/м ²	мм.рт.ст.	мм.в.ст.
1	Па	-	$1 \cdot 10^{-5}$	$10,2 \cdot 10^{-6}$	0,102	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,102
2	Бар	$1 \cdot 10^5$	-	1,02	$10,2 \cdot 10^3$	750	$10,2 \cdot 10^3$
3	кгс/см ²	$98,1 \cdot 10^3$	0,981	-	$1 \cdot 10^4$	735,6	$1 \cdot 10^4$
4	кгс/м ²	9,81	$98,1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^4$	-	$73,56 \cdot 10^{-3}$	1
5	мм.рт.ст.	133,3	$1,333 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	13,6	-	13,6
6	мм.в.ст.	9,81	$98,1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$	-

Кроме того, с импортируемым оборудованием поступают приборы, отградуированные в фунтах на квадратный дюйм - (psi) и в фунтах на квадратный фут - (psf). При переводе в паскаль необходимо использовать следующие соотношения:

$$1\text{psi}=6896.38 \text{ Па};$$

$$1\text{psf}=47.837 \text{ Па}.$$

На рисунке 4.1 представлена диаграмма диапазона давлений (в Па), охватываемая существующими средствами измерений давлений.

Жидкостные приборы. Приборы этого типа благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерения достаточно широко используются при исследовательских и наладочных работах, в лабораторной практике. В качестве рабочей уравнивающей жидкости обычно применяют дистиллированную воду, ртуть, масло, спирт.

Простейшим прибором для измерения давления, разряжения (вакуума) или разности давлений является стеклянный U - образный (двухтрубный) жидкостной манометр (рисунок 4.2). Он состоит из U - образной стеклянной трубки, заполненной примерно до половины своей высоты рабочей жидкостью, и шкалы, позволяющей производить отсчет уровней в обоих коленах.

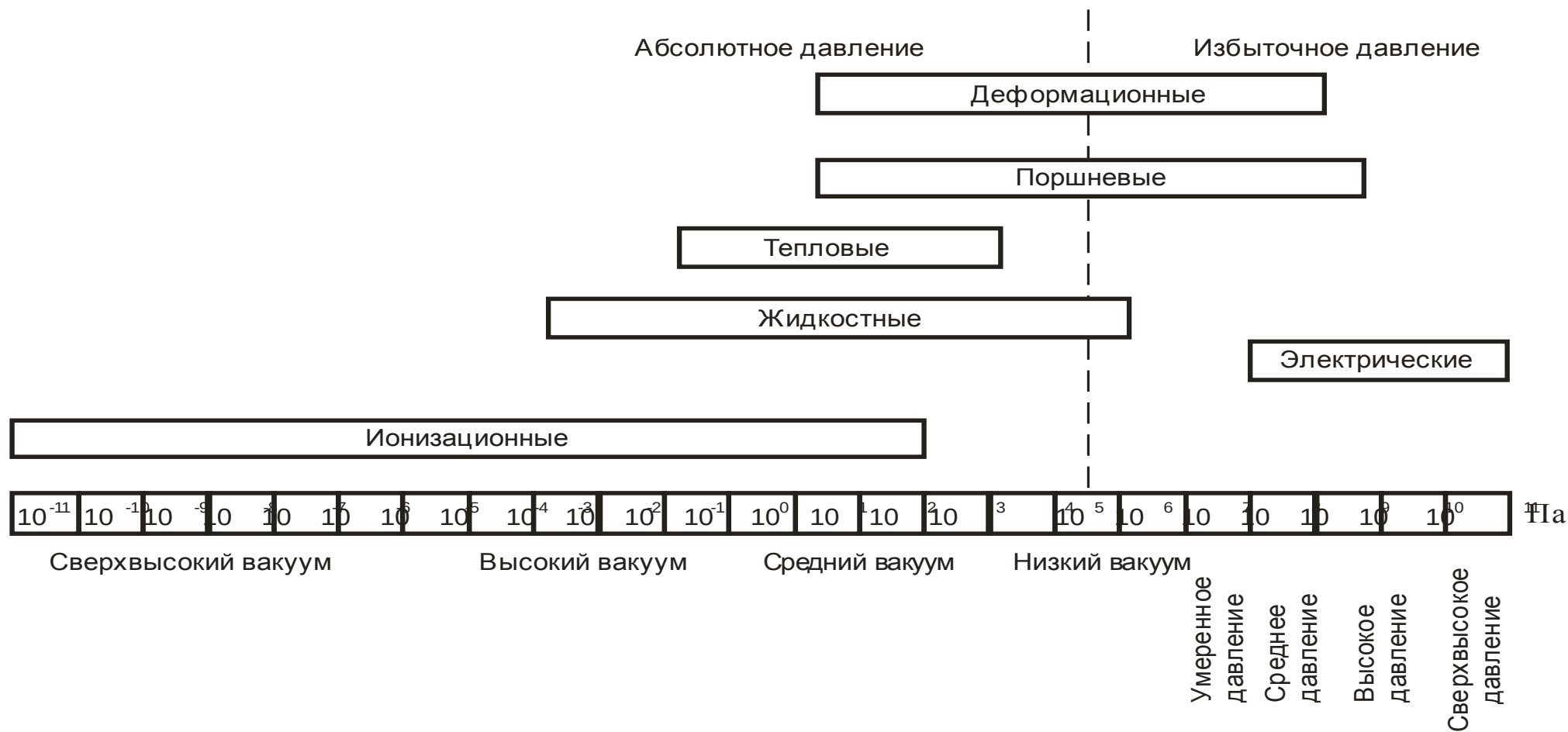


Рисунок 4.1 – Диаграмма давлений, охватываемая существующими средствами измерений давлений

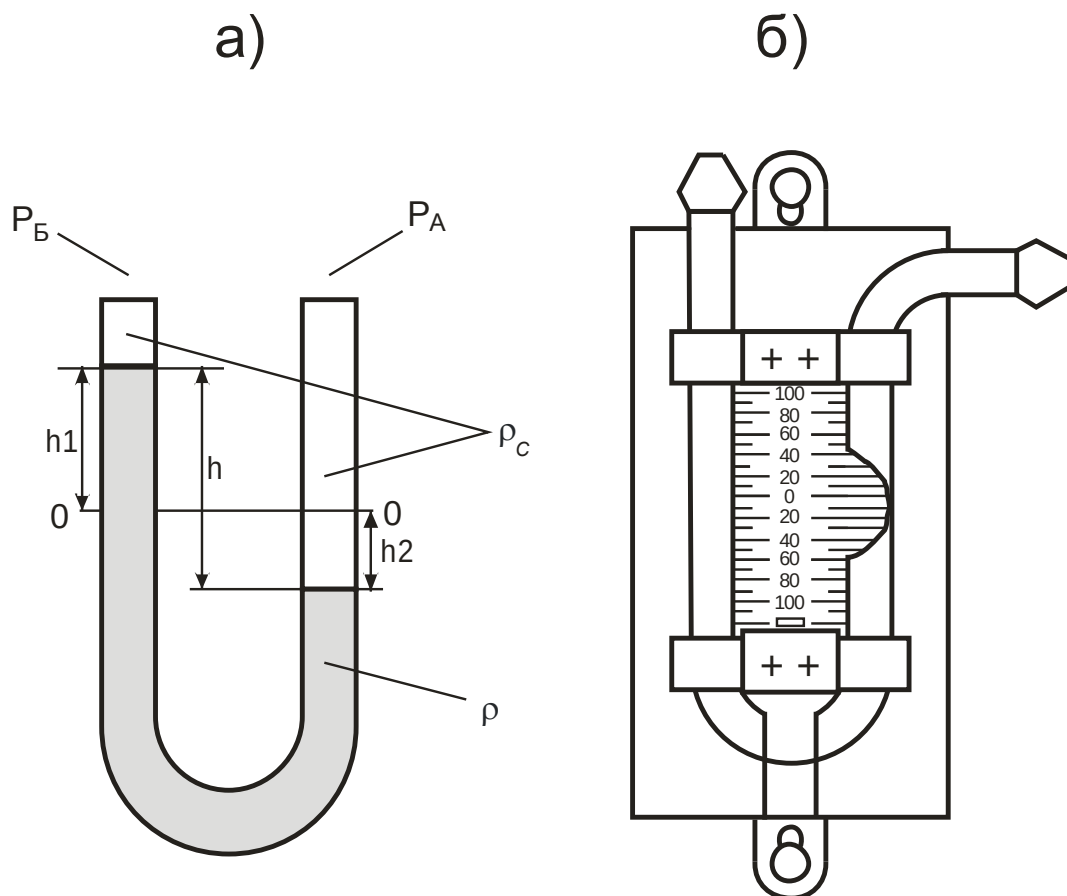


Рисунок 4.2 – Стекланный U-образный жидкостный манометр:
а) схема манометра; б) общий вид манометра

Измеряемое давление, разрежение или разность давлений уравнивается и измеряется столбом h рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов h_1 и h_2 в обоих колене. Для измерения избыточного давления в объекте правое колено манометра соединяют с объектом, а левое оставляют открытым (давление атмосферное); при измерении разрежения – левое колено прибора соединяют с объектом, а правое оставляют открытым. При измерении разности давлений большее давление подводится к правому, а меньшее к левому колену трубки прибора. Результат измерения в зависимости от рабочей жидкости получают в миллиметрах водяного или ртутного столба. Для перевода этого значения в паскаль применяют формулу:

$$P = h g (\rho - \rho_c), \quad (4.1)$$

где g - местное ускорение свободного падения, м/с^2 ;

h - разность уровней рабочей жидкости, м ;

ρ и ρ_c - плотность соответственно рабочей жидкости и среды над рабочей жидкостью, кг/м^3 ;

Если $\rho_c \ll \rho$, то уравнение (4.1) примет вид:

$$P = h g \rho. \quad (4.2)$$

Для перевода значения, выраженного в Па, в значение, выраженное в кгс/м², полученный результат необходимо умножить на 0,102.

Для увеличения точности отсчета высоты столба рабочей жидкости U-образные приборы повышенной точности и образцовые снабжают зеркальной шкалой.

Из выражения (4.2) следует, что для ограничения высоты трубок манометра, которая по условиям прочности и удобства отсчета не должна превышать 1,5м, при измерении избыточных давлений 0,015 - 0,2 МПа следует применять рабочую жидкость с большой плотностью (ртуть), а при более низких давлениях и разрежениях - с малой плотностью (вода, спирт и т. д.). В таблице 4.2 приведены вещества, применяемые в качестве рабочей жидкости, с указанием их плотности в зависимости от температуры.

Однотрубные (чашечные) манометры (рисунок 4.3) в эксплуатации удобнее двухтрубных (отсчет производят по уровню в одной трубке), но погрешность измерения при этом будет выше. С целью снижения погрешности при измерении малых давлений, вакуума измерительную трубку располагают под определенным углом наклона. Такие приборы называют микроманометрами. Их применяют в промышленных условиях при проведении испытаний теплосиловых установок, а также в лабораторной практике. Давление, измеряемое данным манометром, определяется как

$$P = \rho g n (f/F + \sin \alpha).$$

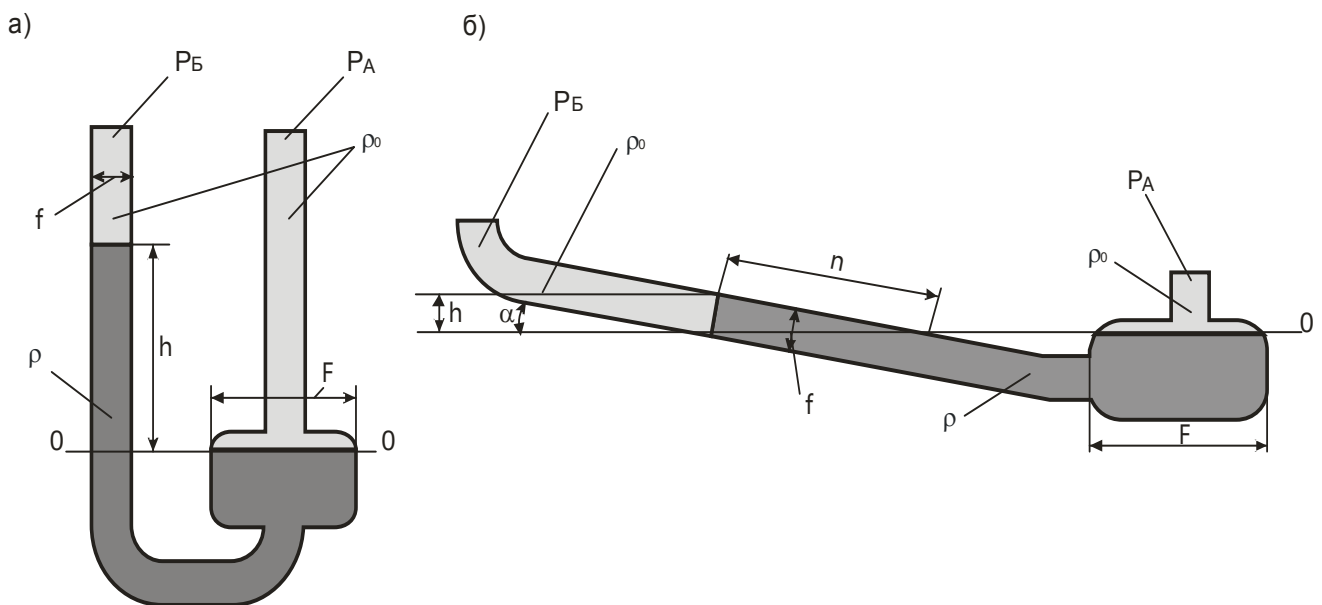


Рисунок 4.3 – Схемы стеклянных однотрубных жидкостных манометров:
а) с вертикальной трубкой; б) с наклонной трубкой.

Таблица 4.2. Основные характеристики рабочих жидкостей

рабочая жидкость	формула	плотность ρ , кг/м ³ , при температуре, °C					
		10	15	20	25	30	35
1. этиловый спирт	C ₂ H ₅ OH	817	813	809	804	800	796
2. дистиллированная вода	H ₂ O	1000	999	998	997	996	994
3. ртуть	Hg	13570	13558	13546	13534	13521	13509
4. бромформ	CHBr ₃	2920	2904	2890	2878	2868	-
5. четыреххлористый углерод	CCl ₄	1614	1604	1594	1585	1575	1566

Приборы с упругими элементами. Для измерения давления, разряжения и разности давлений в промышленных условиях большое распространение получили приборы, основанные на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов. Они охватывают диапазоны измерений от 0 - 160 Па до 0 - 1000 МПа, отличаются простотой и надежностью конструкций, наглядностью показаний, небольшими размерами. Эти приборы выпускаются в виде тягомеров, напоромеров, тягонапоромеров, манометров, вакуумметров, мановакуумметров, дифманометров.

В качестве чувствительных элементов используются мембраны (плоские, гофрированные, неметаллические), мембранные коробки, сильфоны, трубчатые пружины.

Одной из основных характеристик упругого чувствительного элемента является зависимость перемещения λ определенной его точки от величины давления или разности давлений (статическая характеристика $\lambda = f(P)$) (рисунок 4.4). Статическая характеристика чувствительного элемента в зависимости от способа его нагружения может быть линейной и нелинейной. Обычно при проектировании чувствительного элемента стремятся получить линейную статическую характеристику. Для обеспечения надежной работы упругого чувствительного элемента необходимо, чтобы напряжения, возникающие в его материале под действием внешних и внутренних сил, не превышали бы предела упругости. Вследствие несовершенства упругих свойств реальных материалов ход статической характеристики $\lambda = f(P)$ чувствительного элемента при увеличении и уменьшении нагрузки в пределах упругих деформаций неоднозначен и образует так называемую **петлю Гистерезиса** (рисунок 4.4).

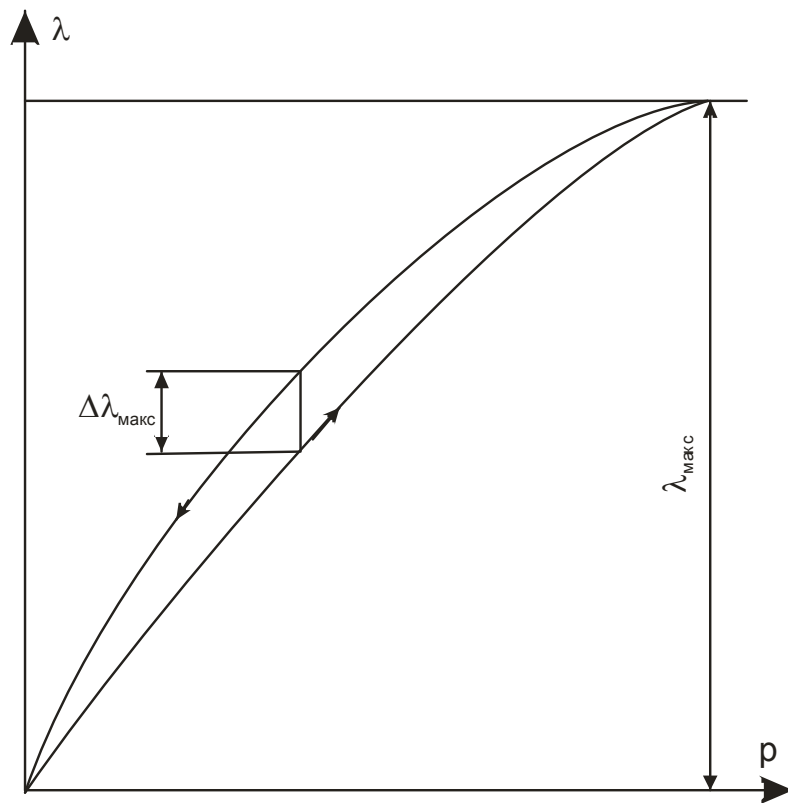


Рисунок 4.4 – Статическая характеристика упругого чувствительного элемента с гистерезисом

Размер гистерезиса определяет погрешность прибора. Основное влияние на его величину оказывают химический состав, структура материала, значение напряжений в материале чувствительного элемента. Несовершенство упругих свойств материалов выражается также в том, что при постоянной нагрузке возможно изменение деформаций во времени - последствие. Если после снятия нагрузки деформации по истечении некоторого времени исчезают полностью, то такое последствие называется упругим. Следует иметь в виду, что упругое последствие, складываясь с гистерезисом, дает увеличение его петли. В практике их обычно не разделяют, а результат их совместного действия называют “практическим гистерезисом” или просто гистерезисом.

При работе упругого чувствительного элемента недопустимо возникновение пластических деформаций материала. Необходимое значение коэффициента запаса определяется требуемой надежностью чувствительного элемента, условиями его работы, точностью расчета напряжений и т. д. При применении приборов давления необходимо иметь в виду, что в условиях переменной температуры изменение модуля упругости материалов чувствительных элементов приводит к появлению дополнительной температурной погрешности показаний прибора.

Ниже приведены краткие характеристики наиболее распространенных типов упругих чувствительных элементов.

Плоские мембраны. Плоские мембраны, изготавливаемые из стали и бронзы, представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины. Они

находят применение в основном в приборах давления специальных конструкций, например, пьезокварцевых, емкостных, индуктивных, с тензопреобразователями и т.п. Приборы этого типа обладают малой инерционностью и их можно использовать для измерения переменных давлений с частотой от нескольких сотен до тысяч герц.

Гофрированные мембраны и мембранные коробки. Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает надежность ее работы и сглаживает статическую характеристику. Формы профилей гофрированных мембран могут быть различны: синусоидальная, трапецеидальная, пильчатая. С увеличением глубины гофрировки жесткость мембраны возрастает. Гофрированные одиночные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются редко. Наибольшее применение для измерения небольших избыточных и вакуумметрических давлений или их разности получили мембранные коробки, образованные двумя спаянными или сваренными гофрированными мембранами (рисунок 4.5 а) и блоки из двух или нескольких мембранных коробок (рисунок 4.5 б).

Неметаллические мембраны. Неметаллические (вялые) мембраны изготавливают из специальной сетчатой ткани (капрона, шелка), покрытой бензомаслостойкой резиной или пластмассой. Неметаллическая мембрана, как правило, имеет жесткий центр, диаметр которого обычно равен 0,8 рабочего. Для обеспечения постоянства эффективной площади кольцевая часть мембраны выполняется с гофром. Жесткость таких мембран недостаточна, поэтому их снабжают винтовой или плоской пружиной. Применяют в напоромерах, тягомерах, дифманометрах, измеряющих малые давления и разности давлений.

Сильфоны. Сильфон представляет собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рисунок 4.6 а). Они нашли применение в напоромерах, тягомерах, вакуумметрах и манометрах для измерения небольшого давления. Жесткость сильфона зависит от его размеров, толщины стенок и упругих свойств материала. Для увеличения жесткости, в необходимых случаях его снабжают винтовой цилиндрической пружиной (рисунок 4.6 б).

Трубчатые пружины. Приборы с трубчатой одновитковой пружиной являются широко распространенными деформационными манометрами. К таким приборам относятся манометры, мановакуумметры и вакуумметры технического общего и специального назначения, контрольные, образцовые, манометры для измерения сверхвысоких давлений, электроконтактные с электро- или пневмодатчиком и др.

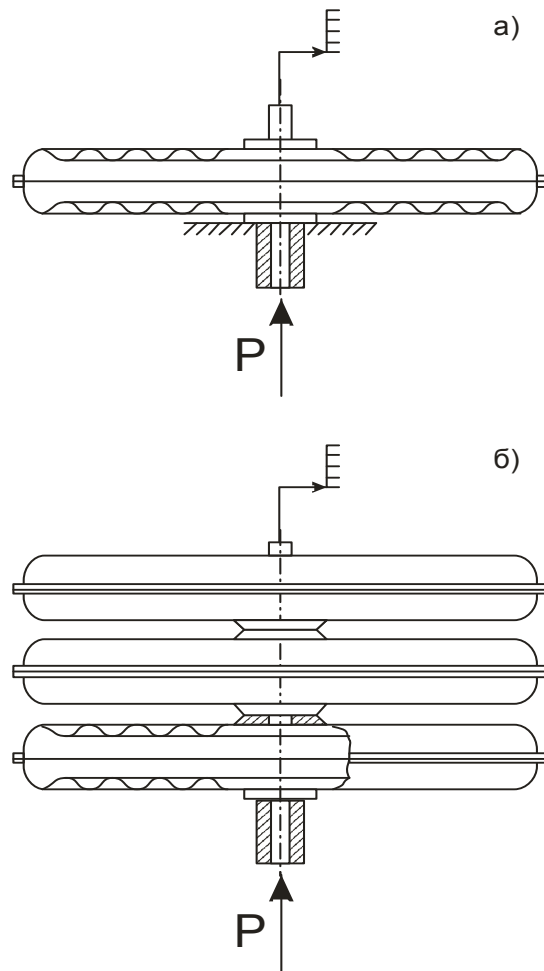


Рисунок 4.5 – Мембранная коробка (а) и мембранный блок(б), собранный из трех мембранных коробок

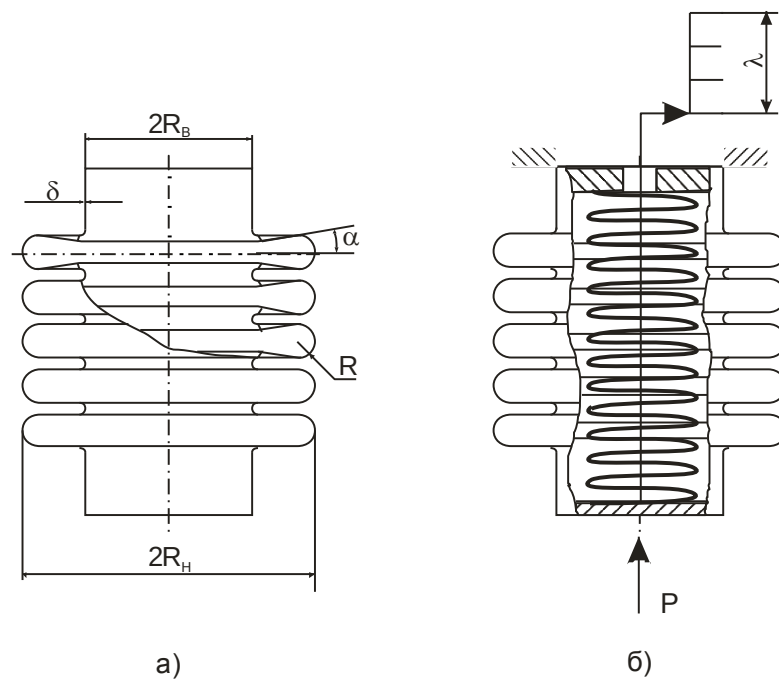


Рисунок 4.6 – Сильфоны бесшовные

Наиболее широкое применение получили пружины Бурдона эллиптического (рисунок 4.7а) и плоскоовального (рисунок 4.7б, в) сечения, а для измерения сверхвысоких давлений трубчатые пружины с эксцентрическим каналом (рисунок 4.7г), предложенные В.Г.Начаткиным.

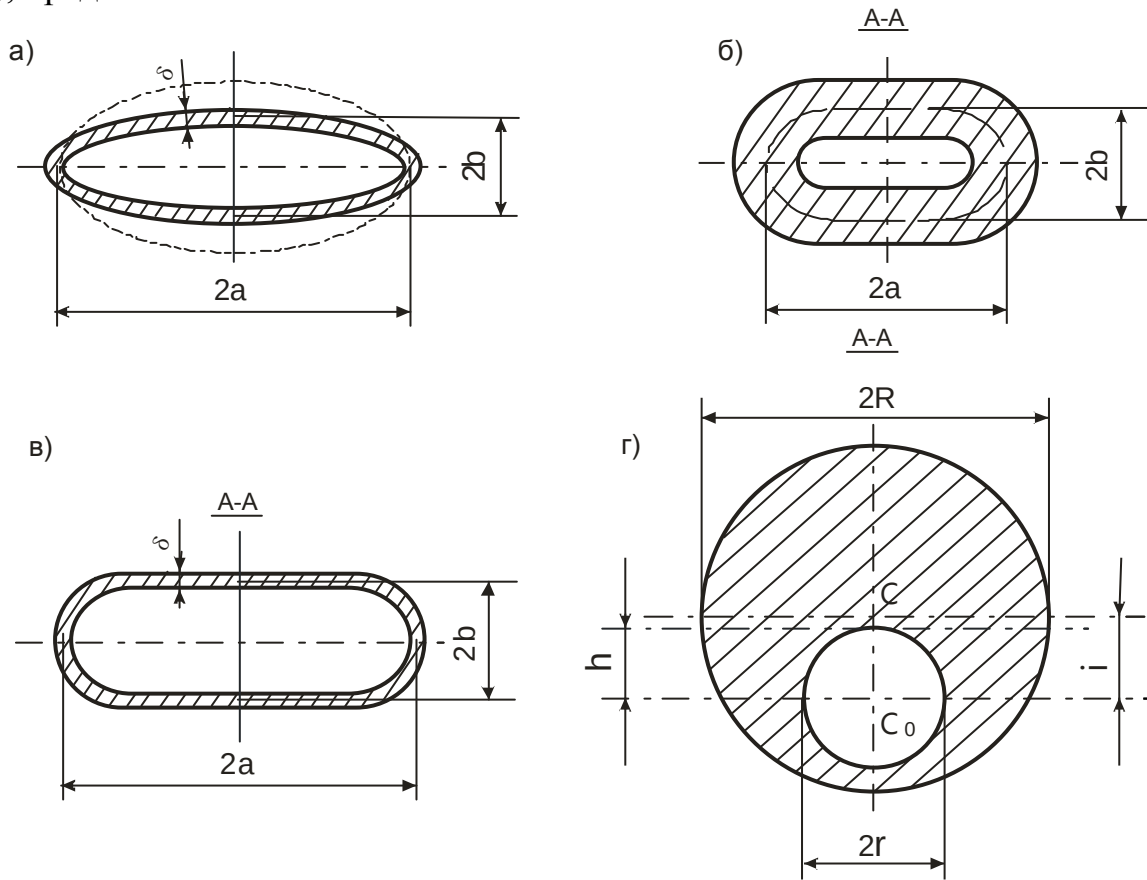


Рисунок 4.7 – Трубчатые пружины деформационных манометров

Трубчатая пружина будет тем чувствительнее, чем больше радиус ее кривизны и чем меньше толщина δ стенок трубки. Кроме того, чувствительность и жесткость пружины зависят от отношения a/b осей поперечного сечения и формы сечения вблизи концов большой оси. Например, пружина эллиптического сечения обладает большей чувствительностью и меньшей жесткостью, чем плоскоовального сечения.

Тонкостенные пружины Бурдона применяют в приборах для измерения давления до 6 МПа, толстостенные овального сечения - от 20 до 160 МПа, пружины с эксцентричным каналом используют при измерении давления в диапазоне 100-1000 МПа.

На рисунке 4.8 приведена схема трубчатого манометра

Чувствительный элемент трубчатого манометра выполнен в форме согнутой по дуге круга на угол $\gamma \approx 270^\circ$ трубки некруглого сечения (овального, эллиптического или с эксцентричным каналом). Один конец трубки А закреплен к неподвижному штуцеру, через который внутренняя полость трубки сообщается с

измеряемой средой, а второй В - наглухо запаян и соединен с передаточным механизмом.

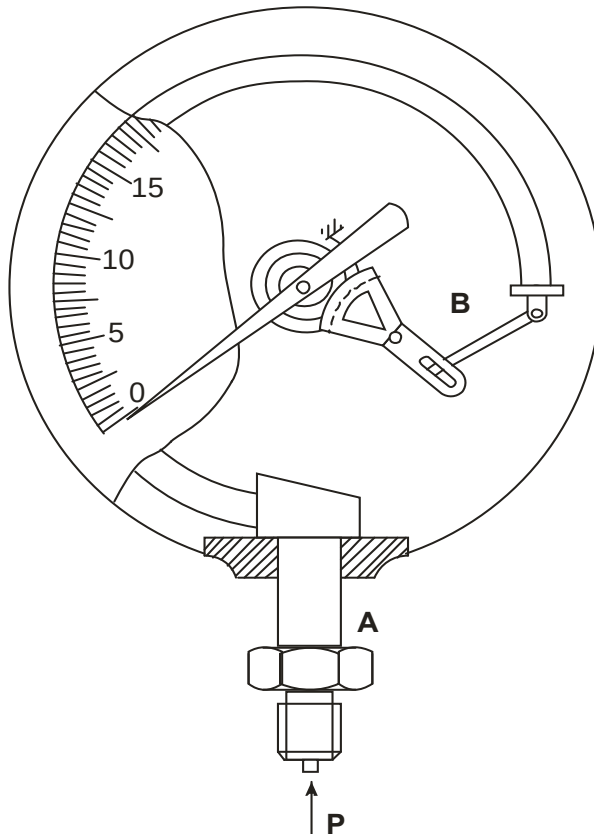


Рисунок 4.8 – Манометр с одновитковой трубчатой пружиной

Под действием давления P , подаваемого во внутреннюю полость трубки, пружина деформируется в поперечном сечении и стремится принять форму круга, изображенную на рисунок 4.7а пунктиром, т.е. малая ось эллипса будет увеличиваться, а длины дуг остаются практически постоянными за счет раскручивания пружины.

При этом ее свободный конец совершит некоторое линейное перемещение. Ввиду того, что это перемещение весьма незначительно, для большей наглядности показаний его увеличивают посредством зубчато-секторного или рычажного передаточного механизма. Рычажные механизмы обычно применяют в приборах устойчивых к вибрации. Перемещение свободного конца трубчатой пружины под действием давления находится в прямой зависимости от этого давления, поэтому шкала манометра равномерна. Но данная зависимость сохраняется только до определенного предела, называемого пределом пропорциональности, после которого возрастание давления приводит к резкому росту перемещения конца пружины. Это вызывает появление в металле пружины остаточной деформации и манометр становится непригодным для измерений. Наибольшее давление (конечное значение шкалы манометра) принимается обычно не более половины ее предела пропорциональности.

Тензометрические приборы. Отдельным видом бесшкальных первичных преобразователей давления являются тензометрические преобразователи, обладающие простотой устройства, высокой точностью, надежностью и быстродействием, незначительными габаритами и массой, большой виброустойчивостью.

Действие измерительных тензопреобразователей основано на явлении тензоэффекта, суть которого состоит в изменении электрического сопротивления упругого тела при его деформации. Тензопреобразователи могут выполняться из металлической проволоки, но наиболее широкое применение получили полупроводниковые тензопреобразователи, представляющие собой тонкую пленку монокристаллического кремния (полупроводник), наклеенного или напыленного на поверхность пластинки из монокристаллического сапфира (электроизолятор). Они обладают более высокой тензочувствительностью, чем металлические тензорезисторы. Применение тонкопленочных полупроводниковых тензорезисторов с усилительным устройством в микроэлектронном исполнении позволяет с помощью усилителя получить пропорциональный давлению унифицированный входной сигнал постоянного тока 0-5 мА, 0-20 мА или 4-20 мА.

Связь между изменением сопротивления тензорезистора и его деформацией устанавливается соотношением:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}; \quad (4.3)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ - относительное изменение сопротивления тензорезистора;
 K - постоянный коэффициент, зависящий от материала тензорезистора;
 $\frac{\Delta l}{l}$ - относительное изменение длины тензорезистора.

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать их непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяет отказаться от использования клеящих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей. На рисунок 4.9а показана сапфировая мембрана 3 с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами с положительной 1 и отрицательной 2 чувствительностями. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\Delta R/R > 0$, если же $\Delta R/R < 0$ - чувствительность отрицательная. Структура однополоскового тензорезистора приведена на рисунке 4.9б. Здесь 1 - тензорезистор; 2 - защитное покрытие; 3 - металлизированные токоведущие дорожки; 4 - упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана). Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они

будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы и в каждое из плеч моста включать тензорезисторы с соответствующим значением $\Delta R/R$.

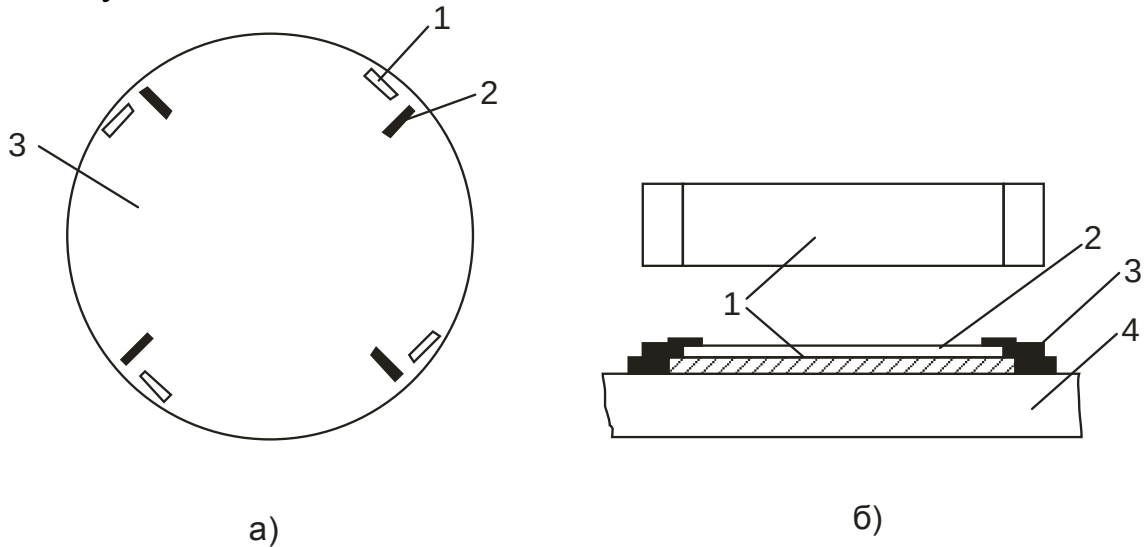


Рисунок 4.9 – Схемы тензорезисторных чувствительных элементов

На рисунке 4.10 приведена схема тензорезисторного измерительного преобразователя разности давлений. Мембранный тензомодуль 4 представляет собой металлическую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с четырьмя напыленными кремниевыми тензорезисторами, образующими плечи неравновесного моста. Тензомодуль закреплен на основании 2 и отделен от измеряемой среды двумя разделительными металлическими мембранами 1 и 3. Замкнутые полости между тензомодулем и мембранами 1 и 3 заполнены полиметилсилоксановой жидкостью. Измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ воздействует на тензомодуль через указанные мембраны и жидкость. Через герметичные выводы 5 тензомодуль подключается к встроенному электронному устройству, предназначенному для преобразования изменения сопротивления тензорезисторов в унифицированный токовый выходной сигнал (0-5; 0-20 или 4-25 мА), который по двухпроводной линии дистанционной передачи поступает к блоку питания 7. Одновременно по этой линии передается выходной токовый сигнал. Блок питания служит для повышения мощности выходного сигнала до уровня, необходимого для подключения внешней нагрузки R_n и формирования заданного уровня выходного сигнала (0-5; 0-20 или 4-20 мА).

В тензорезисторных преобразователях избыточного давления, абсолютного давления и разрежения используются аналогичные измерительные блоки. Отличие состоит в том, что измерительный преобразователь подключается к объекту “плюсовой” камерой, а “минусовой” сообщается с атмосферой. У измерительных преобразователей абсолютного давления “минусовая” камера вакуумирована.

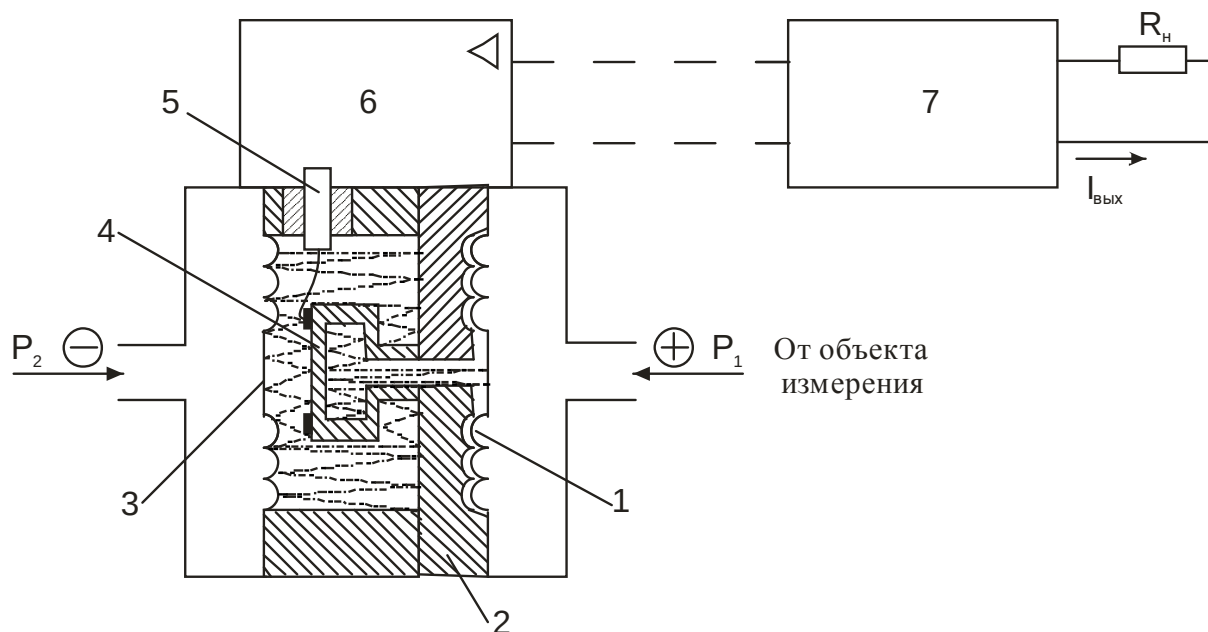


Рисунок 4.10 – Схемы тензорезисторных измерительных преобразователей разности давлений с унифицированным токовым выходным сигналом

На рисунок 4.11а, б, представлены модификации тензопреобразователей, применяемые в приборах серии “Сапфир-22”.

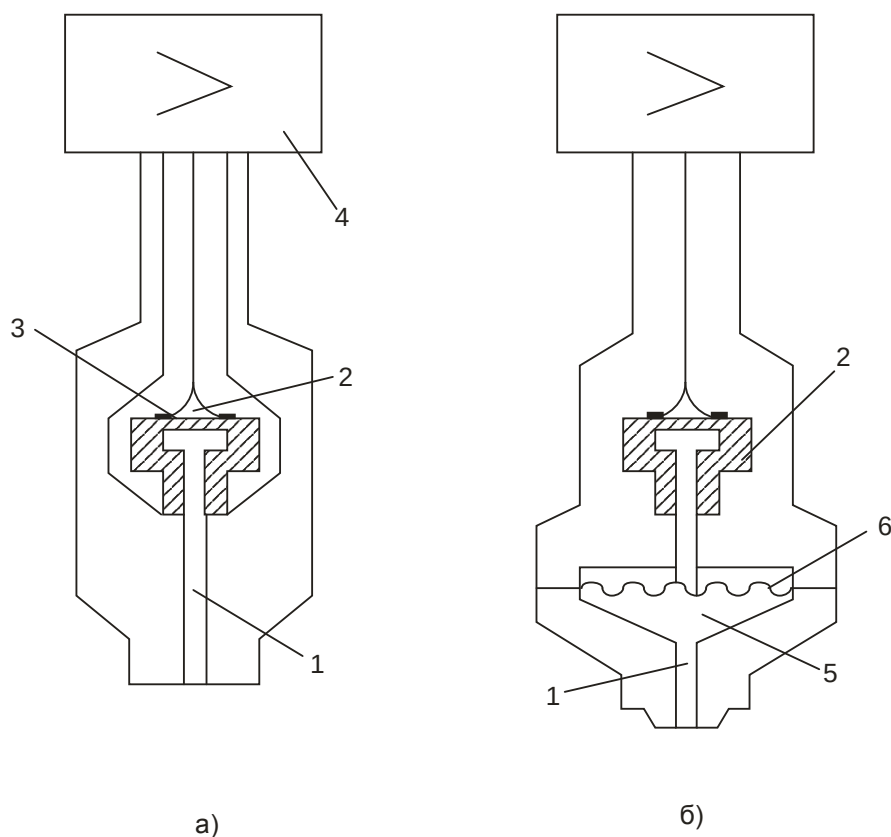


Рисунок 4.11 – Схема устройства тензометрических преобразователей давления серии «Сапфир»: а) схема прибора без разделительной мембраны, б) схема прибора с разделительной мембраной

Давление измеряемой среды по каналу 1 при поступлении в мембранный тензопреобразователь 2 вызывает прогиб его мембраны, что, в свою очередь, изменяет сопротивление тензорезисторов 3. Электрический сигнал по термopроводу передается в электронное устройство 4.

В модификации, представленной на рисунок 4.11б, измеряемая среда поступает в полость 5, отделенную разделительной металлической гофрированной мембраной 6 от тензопреобразователя 2. Полость над мембраной заполнена кремнийорганической жидкостью. Под давлением измеряемой среды мембрана 6 прогибается, кремнийорганическая жидкость изменяет давление на мембрану чувствительного элемента, и дальнейший процесс измерения электрического сигнала протекает так же, как в предыдущем случае.

Приборы с разделительной мембраной нашли широкое применение для измерения давления агрессивных и загрязненных сред. Материалы разделительных мембран выбираются в зависимости от степени агрессивности измеряемой среды.

Диапазоны измерений:

- избыточного давления 0 - 2,5 кПа; 0 - 100 МПа;
- абсолютного давления 0 - 2,5 кПа; 0 - 2,5 МПа;
- разности давлений от 0 - 1 кПа до 0 - 2,5 МПа;
- разрежения от -1 - 0 до - 10 - 0 кПа.

Для измерения перепада давлений тензопреобразователь размещают в полости, отделенной двумя металлическими гофрированными мембранами с каждой стороны, куда подается давление измеряемой среды, независимо от того, агрессивна среда или нет.

Современные конструкции датчиков давления. Принцип действия современных конструкций датчиков давления основан на использовании пьезорезистивного эффекта в гетероэпитаксиальной пленке кремния, выращенной на поверхности монокристаллической пластины из искусственного сапфира. Чувствительный элемент с монокристаллической структурой кремния на сапфире является основой всех сенсорных блоков датчиков семейства «Метран».

При деформации чувствительного монокристаллического элемента под воздействием входной измеряемой величины (например, давления или разности давлений) изменяется электрическое сопротивление кремниевых пьезорезисторов мостовой схемы на поверхности этого чувствительного элемента.

Электронное устройство датчика преобразует этот электрический сигнал от тензопреобразователя в стандартный аналоговый сигнал постоянного тока и/или в цифровой сигнал в стандарте протокола HART.

В памяти сенсорного блока (АЦП) хранятся в цифровом формате результаты калибровки сенсора во всем рабочем диапазоне давлений и температур. Эти

данные используются микропроцессором для расчета коэффициентов коррекции выходного сигнала при работе датчика.

Цифровой сигнал с платы АЦП сенсорного блока вместе с коэффициентами коррекции поступает на вход электронного преобразователя, микроконтроллер которого производит коррекцию и линеаризацию характеристики сенсорного блока, вычисляет скорректированное значение выходного сигнала и передает его в цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), который преобразует его в аналоговый выходной сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте HART.

Для лучшего обзора жидкокристаллического индикатора (ЖКИ) и для удобного доступа к двум отделениям электронного преобразователя последний может быть повернут относительно измерительного блока от установленного положения на угол не более 90° против часовой стрелки.

На данном принципе действия созданы датчики давления, предназначенные для непрерывного преобразования значения измеряемого параметра (абсолютного давления, избыточного давления, разрежения, давления-разрежения, разности давлений) в унифицированный токовый сигнал в системах автоматического управления, контроля и регулирования технологических процессов. На объектах энергетики большое будущее при измерении избыточного давления и перепада давлений принадлежит датчикам с емкостной ячейкой (см. рисунок 4.12).

Во время работы датчика на базе емкостного сенсора разделительные мембраны находятся со стороны высокого и низкого давления датчика, передают рабочее давление процесса заполняющей масляной жидкости. Эта жидкость, в свою очередь, передает давление сенсорной мембране в центре σ -ячейки сенсора. Сенсорная мембрана действует как растянутая пружина, отклоняясь в ответ на перепад давлений (в датчиках избыточного давления атмосферное давление прикладывается аналогичным образом со стороны низкого давления).

Для измерения абсолютного и избыточного давления используют датчики с пьезорезистивным сенсором. На датчиках с пьезорезистивным сенсором, абсолютное давление, приложенное к разделительной мембране, передается на поликремниевый сенсор через кремнийорганическую или инертную жидкость, как показано на рисунке 4.13. Давление процесса, приложенное к сенсору, создает очень малый прогиб чувствительной мембраны, который приводит к изменению сопротивления в цепи мостика Уитсона. Изменение сопротивления, характеризующее давление, преобразуется в цифровой сигнал для обработки микропроцессором.

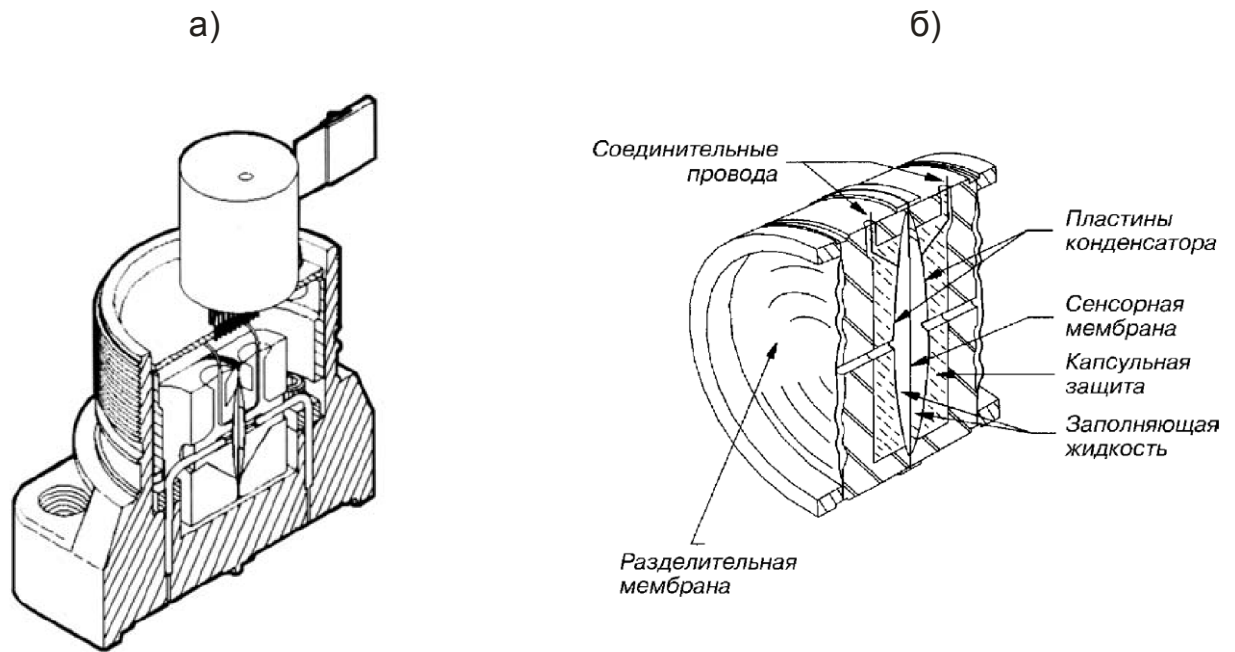


Рисунок 4.12 – Сенсорный модуль датчика давления на базе емкостной ячейки:
а) емкостный сенсор; б) емкостная ячейка

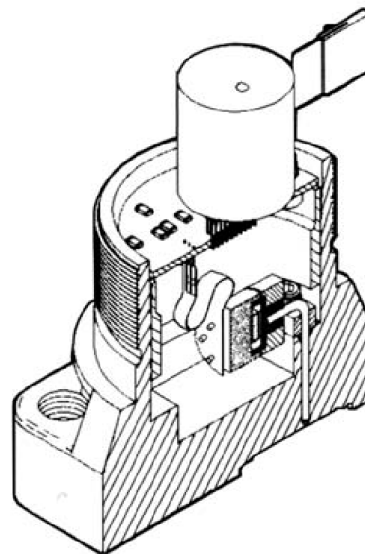


Рисунок 4.13 – Сенсорный модуль датчика давления
с пьезорезистивным сенсором

Тема 4.2. Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры типа Анньюбар. Электромагнитные расходомеры. Вихревые расходомеры

Прибор, измеряющий расход, т.е. количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени называют расходомером.

Прибор, измеряющий количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени называют счетчиком количества.

Количество вещества выражают в единицах объема или массы:

- объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, $\text{л}/\text{ч}$);
- массовый расход ($\text{кг}/\text{с}$, $\text{кг}/\text{ч}$, $\text{т}/\text{ч}$).

В настоящее время получили широкое распространение следующие методы измерения расхода вещества:

1. Метод измерения расхода среды по перепаду давления в сужающем устройстве (расходомеры переменного перепада давления).

2. Метод измерения расхода среды напорной трубкой (расходомеры типа Анньюбар).

3. Метод измерения электропроводных сред, основанный на законе электромагнитной индукции.

4. Метод преобразования поступательного движения измеряемой среды в вихревую дорожку Кармана с помощью установленного поперек потока тела обтекания и далее измерения частоты срыва вихрей (вихревые расходомеры).

5. Метод измерения расхода среды, основанный на определении времени прохождения случайными неоднородностями потока некоторого расстояния между двумя точками трубопровода, где эти неоднородности детектируются (корреляционные расходомеры).

6. Метод измерения расхода среды на основе доплеровского метода определения средней скорости потока (ультразвуковые расходомеры).

7. Метод измерения расхода среды, основанный на эффекте Кориолиса (кориолисовые расходомеры)

Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве. Сужающее устройство выполняет функции первичного преобразователя, устанавливается в трубопроводе и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании среды повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства, т.е. создается перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$, зависящий от скорости потока и расхода среды. Здесь ΔP служит мерой расхода среды, протекающей в трубопроводе (ΔP измеряется дифманометром). В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара применяют - диафрагмы, сопла, сопла Вентури.

Диафрагма - тонкий диск с отверстием круглого сечения (рисунок 4.14 а). В мертвой зоне возникает обратное движение жидкости, приводящее к образованию вихрей (вследствие разности давлений). На вихреобразование затрачивается часть энергии и имеет место потеря давления (рисунок 4.14б). Давление струи около трубопровода P_1 несколько возрастает за счет подпора перед диафрагмой. Стандартная диафрагма может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром ≥ 50 мм при $0,05 \leq m \leq 0,7$. Отбор давления производится через кольцевые камеры или отдельные отверстия (см. рисунок 4.15). Через кольцевые камеры отбор является более представительным.

Сопло выполнено в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе (рисунок 4.16а). Вихреобразование за соплом вызывает меньшую потерю энергии, чем у диафрагмы ($P_{\text{п}}^{\text{сопла}} < P_{\text{п}}^{\text{диафр}}$). При равных ΔP для одного и того же расхода проходное сечение для диафрагмы больше, чем для сопла, поэтому $P_{\text{п}}^{\text{сопла}} \cong P_{\text{п}}^{\text{диафр}}$ (рисунок 4.16б). Сопло может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром ≥ 50 мм при $0,05 \leq m \leq 0,65$.

Измерение ΔP такое как и у диафрагмы. Сопло менее чувствительно к загрязнению и коррозии чем диафрагма. При измерении расхода пара и газа сопло обеспечивает более высокую точность.

Сопло Вентури состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок и диффузора (рисунок 4.17а). Сопла Вентури позволяют получать минимальные потери напора $P_{\text{п}}$ ($P_{\text{п}}^{\text{вент}} < P_{\text{п}}^{\text{сопла}}$) (рис. 4.17б). Потери напора $P_{\text{п}}$ снижаются с уменьшением угла конусности ϕ .

Сопло Вентури может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром ≥ 50 мм при $0,05 \leq m \leq 0,6$. Отбор давления производится через кольцевые камеры.

УРАВНЕНИЕ РАСХОДА ДЛЯ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ (для сечения А-А, В-В, рисунок 4.14б)

Из уравнения закона сохранения энергии:

$$\int v dv = - \int \frac{dP}{\rho}.$$

Так как жидкость несжимаема ($\rho = \rho_1 = \rho_2 = \text{const}$), то:

$$P_1' - P_2' = \frac{\rho}{2} (V_2'^2 - V_1'^2).$$

Из условия непрерывности струи для несжимаемой жидкости:

$$F_1 V_1 = F_2 V_2';$$

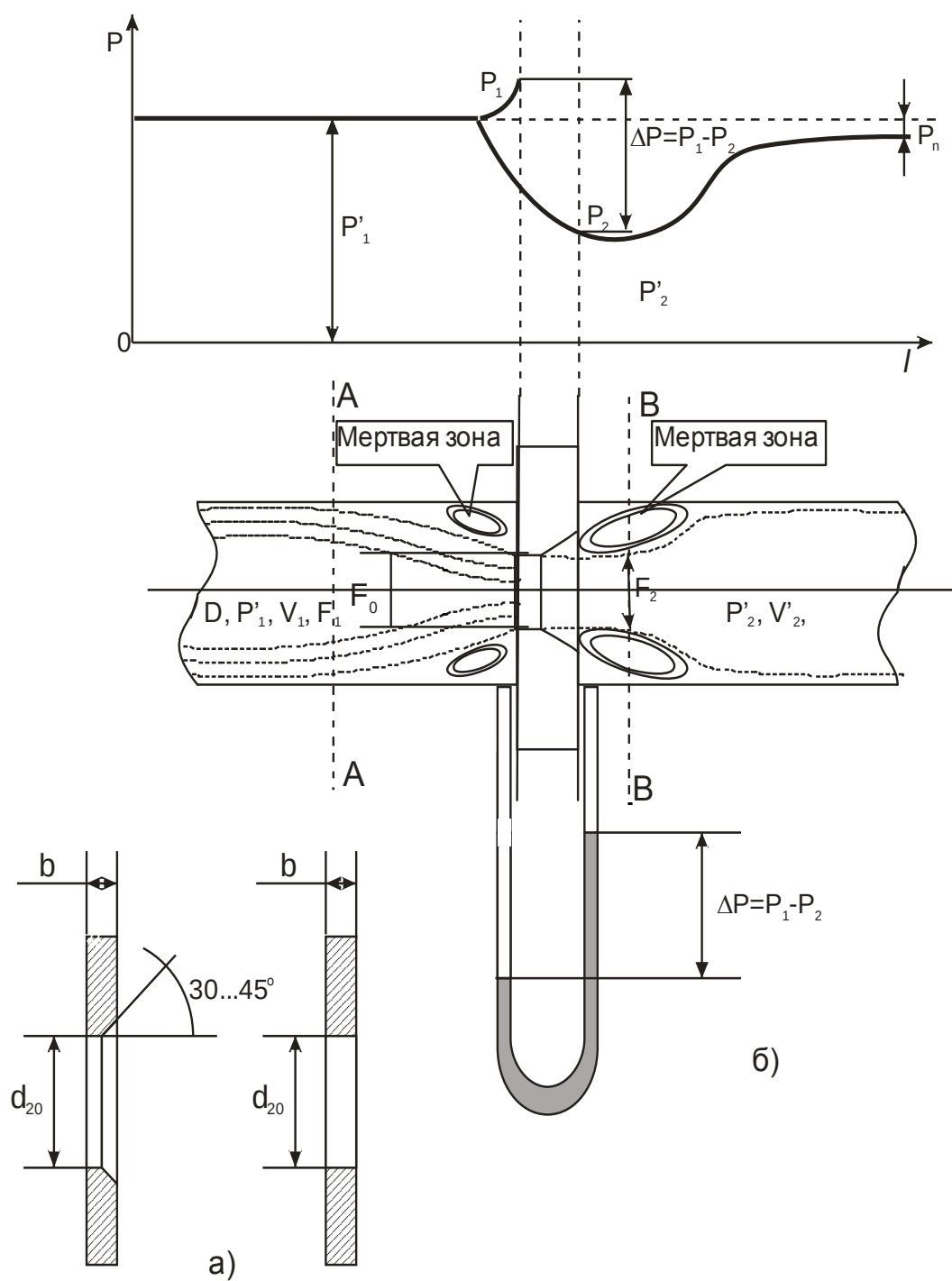


Рисунок 4.14 – Конструкция (а), характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе сужающего устройства (б) - диафрагмы

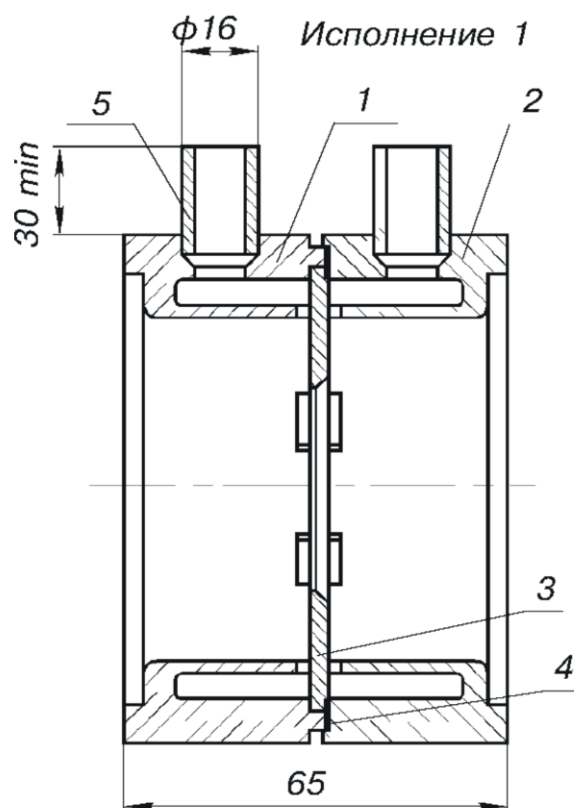


Рисунок 4.15 – Конструкция диафрагмы ДКС:

1 – корпус плюсовой кольцевой камеры; 2 – корпус минусовой кольцевой камеры;
3 – диафрагма; 4 – уплотнительная прокладка; 5 – патрубок.

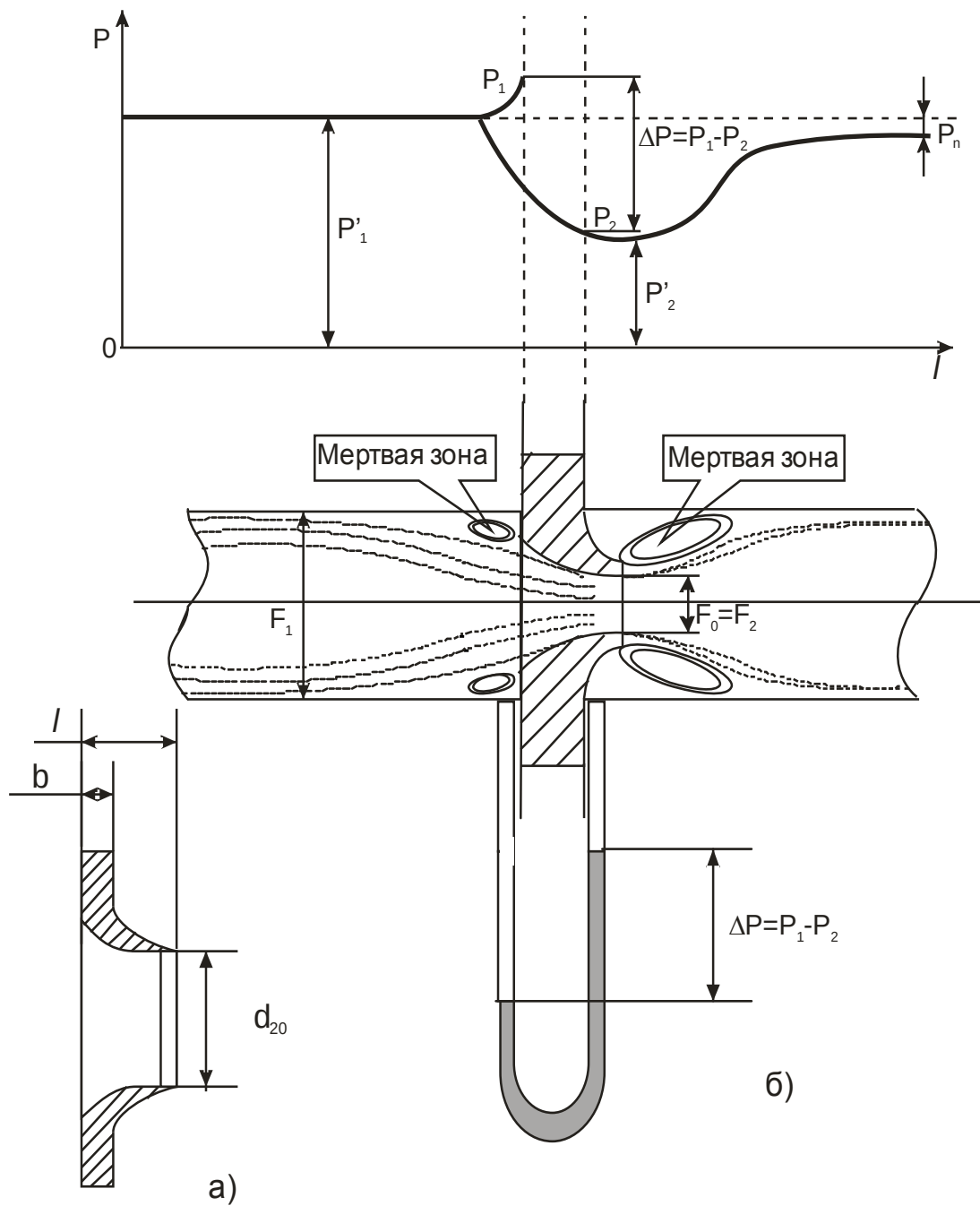
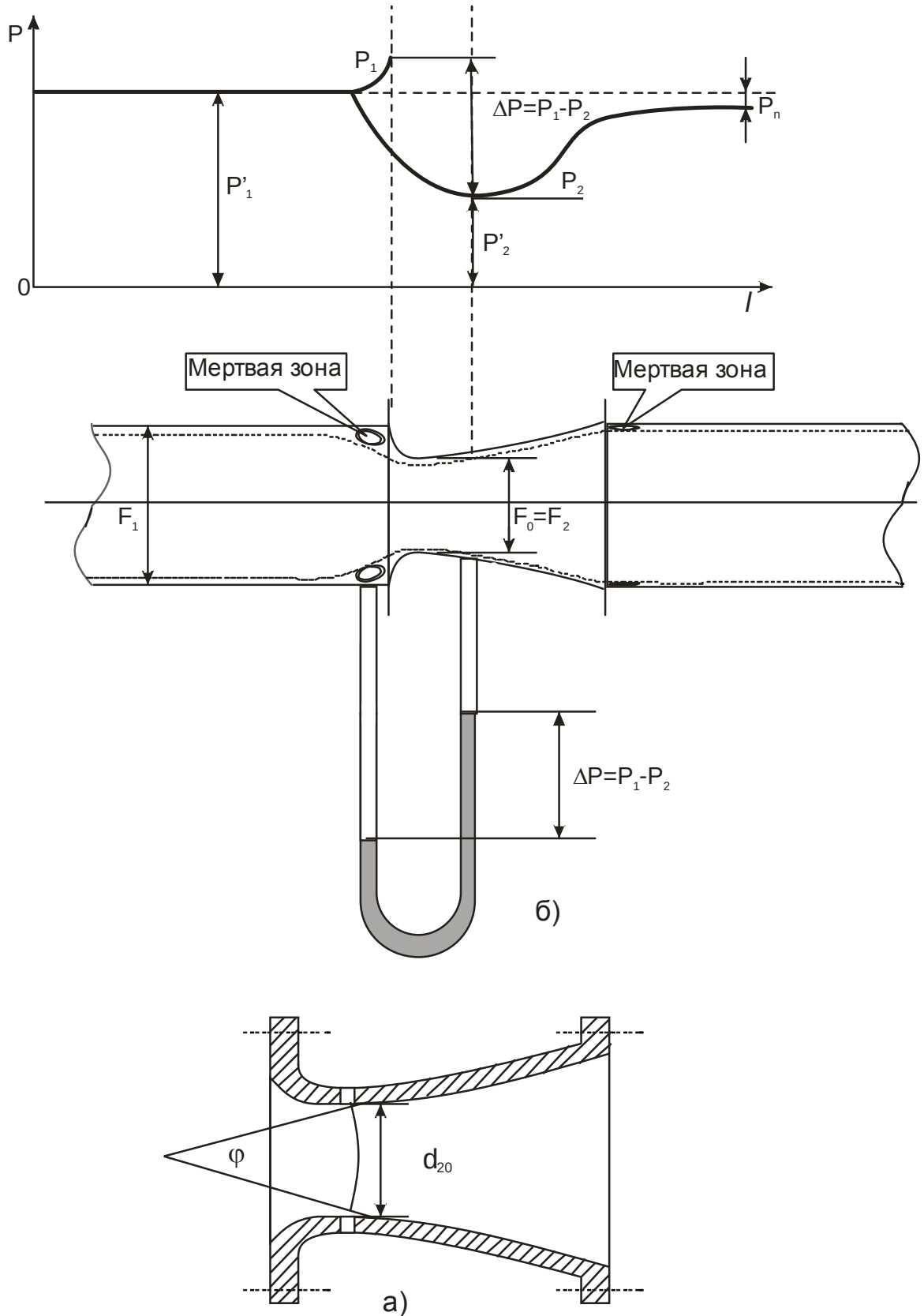


Рисунок 4.16 – Конструкция (а), характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе сужающего устройства (б) - сопла



$$F_2 = \mu F_0,$$

где μ - коэффициент сужения струи.

Далее:

$$V_1 = \mu V_2' \frac{F_0}{F_1} = \mu V_2' m,$$

где F_0 - площадь отверстия сужающего устройства при рабочей температуре, м²;

F_1 - площадь трубопровода, м²;

m - относительная площадь (модуль) сужающего устройства, $m = d^2/D^2$.

Средняя скорость V_2' в сечении F_2 :

$$V_2' = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1' - P_2')},$$

и переходим к V_2 :

$$V_2 = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}.$$

Отсюда массовый расход

$$Q_m = V_2 \rho F_2 = \mu V_2 \rho F_0 = \frac{\mu \zeta}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} F_0 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)} = \alpha F_0 \sqrt{2 \rho (P_1 - P_2)}, \quad (4.4)$$

где α – коэффициент расхода.

Объемный расход

$$Q_0 = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (4.5)$$

УРАВНЕНИЕ РАСХОДА ДЛЯ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

В случае измерения расхода сжимаемой среды (газа или пара) необходимо учитывать изменение ρ вещества в связи с изменением давления при протекании через сужающее устройство

$$Q_m = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2 \rho \Delta P}.$$

$$Q_0 = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}.$$

Здесь ε - поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

$$\varepsilon = \frac{\alpha_k}{\alpha} \sqrt{\frac{1 - \mu_k^2 m^2}{1 - \mu_k^2 m^2 \left(\frac{m_2}{m_1}\right)^{2/\kappa}}} \sqrt{\frac{P_1}{P_1 - P_2} \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/\kappa} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}; \quad (4.6)$$

$$\alpha_k = \frac{\mu_k \zeta}{\sqrt{1 - \mu_k^2 m^2}},$$

где κ - показатель адиабаты;

$$\mu_k - \text{коэффициент сужения сжимаемой среды, } \mu_k = f\left(\frac{P_2}{P_1}\right).$$

Данные уравнения применимы, когда скорость потока в сужающем устройстве не достигает критической т.е. скорости звука. Наименьшее сечение струи в случае сопл и сопл Вентури может быть принято равным сечению цилиндрической части этих суживающих устройств, т.е. $\mu = \mu_k = 1$ и радиальное расширение струи можно не принимать во внимание и $\alpha_k = \alpha$.

Поэтому для сопл и сопл Вентури ε можно рассчитать, для диафрагм ε определяют экспериментально.

При измерении расхода среды методом переменного перепада необходимо учитывать, что диапазон измерения, в котором нормируется погрешности, находится в интервале от 30 до 100% максимального расхода ($Q_{\max}$). Так, при уменьшении расхода в 4 раза по сравнению с $Q_{\max}$ ΔP уменьшается в 16 раз, а при уменьшении расхода в 10 раз – соответственно в 100 раз, при этом относительная погрешность измерения ΔP увеличивается в тех же соотношениях. Здесь средняя квадратичная погрешность измерения расхода определяется как

$$G_Q = \sqrt{G_\alpha^2 + G_\varepsilon^2 + G_{\Delta P}^2 + \left(\frac{1}{2} G_\rho\right)^2 + 4G_d^2} \quad (4.7)$$

где G_α , G_ε , $G_{\Delta P}$, G_ρ , G_d – средние квадратичные погрешности измерений соответственно α , ε , ΔP , ρ , d .

При установке сужающих устройств длина прямого входного участка должна составлять 10...80 диаметров при $m=0,05...0,64$, а выходного участка – 4...8 диаметров. Причем длина участка с минимальной шероховатостью до и после сужающего устройства должна составлять 2 диаметра.

Электромагнитные расходомеры. Электромагнитные расходомеры применяют для измерения в трубопроводах объемного расхода электропроводных сред с удельной электрической проводимостью в пределах от 10^{-3} до 10 См/м. Принцип действия расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, согласно которому наведенная в проводнике ЭДС $\propto$ скорости его движения в магнитном поле. Различают схемы электромагнитных расходомеров с постоянным и переменным магнитным полем.

Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем (рисунок 4.18). Выходная ЭДС расходомера здесь определяется как:

$$E = VDB, \quad (4.8)$$

где V - средняя скорость движения жидкости, м/с;

D - внутренний диаметр трубы, м;

B - магнитная индукция, Тл.

Так как

$$Q_0 = \frac{\pi D^2 V}{4},$$

то

$$E = \frac{4BQ_0}{\pi D}.$$

Электрическая проводимость материала трубы должна быть меньше проводимости жидкости, в противном случае возникает шунтирование стенкой трубы выходной ЭДС.

К достоинствам электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем можно отнести отсутствие источника питания преобразователя расхода, безопасность измерения расхода, большое быстродействие, помехозащищенность, отсутствие потери напора.

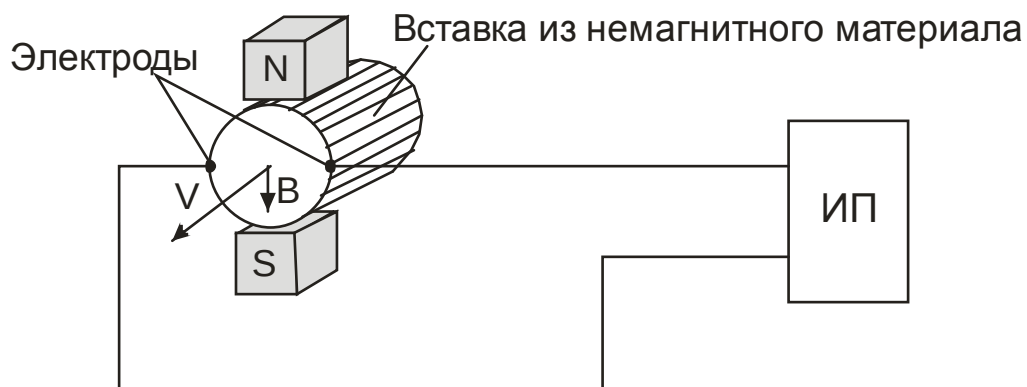
К недостаткам - поляризацию электродов, приводящую к нарушению стабильности работы преобразователя.

При поляризации происходит концентрация у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного – положительных. В результате этого на границе электродов создается ЭДС поляризации, направленная против основной измеряемой ЭДС, что изменяет во времени градуировочные характеристики прибора. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем нельзя применять для жидкостей с ионной проводимостью

Электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем (рисунок 4.19). Здесь выходная ЭДС определяется как:

$$E = \frac{4Q_0}{\pi D} B_{\max} \sin \omega t \quad (4.9)$$

и имеет место значительно меньшая поляризация электродов.



ИП - измерительный прибор

Рисунок 4.18 – Электромагнитный расходомер с постоянным магнитным полем

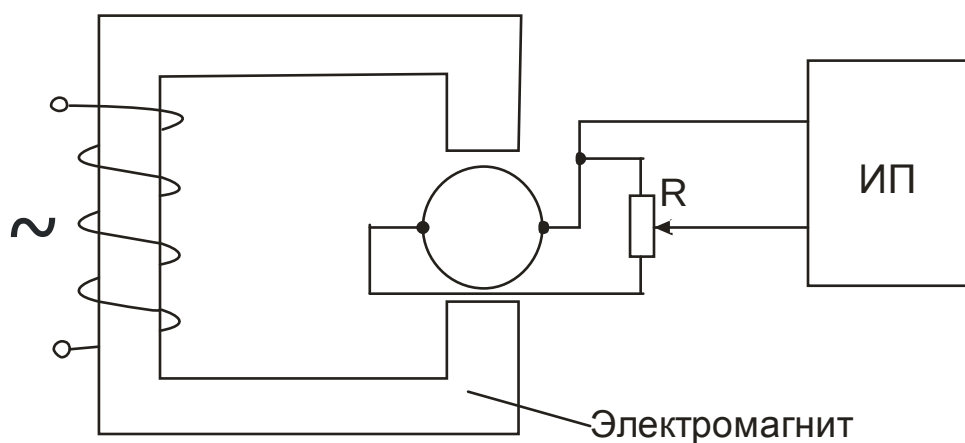


Рисунок 4.19 – Электромагнитный расходомер с переменным магнитным полем

Как при турбулентном, так и при ламинарном течении потока показания электромагнитного расходомера при одном и том же расходе и осесимметричном потоке будут одинаковы. Погрешность измерения для этих расходомеров составляет 0,5...1%, а диапазон измерения 1:20 и даже 1:100. Рабочее давление – до 100 МПа.

Вихревые расходомеры .В основу работы расходомеров положен принцип преобразования поступательного движения измеряемой среды в вихревую дорожку Кармана с помощью установленного поперек потока тела обтекания

(рисунок 4.20). Применяются для измерения расхода пара, газа и жидкости с вязкостью не более 2 сСт.

Дорожка Кармана представляет собой ряд параллельных, расположенных в шахматном порядке вихрей, срывающихся поочередно с боковых поверхностей тела обтекания и уходящих вниз по потоку с частотой f_v .

$$f_v = Sh \frac{V}{d} = Sh D_y^{-3} \left\{ 3600 \left[2 \left(\frac{\pi}{4} - 0,5 \arcsin \alpha \right) - 0,5 \alpha^2 (1 - \alpha^2)^{0,5} \right] \right\}^{-1} = KQ \quad (4.10)$$

где Sh – критерий гидродинамического подобия (число Струхала);

$$\alpha = \frac{d}{D_y};$$

K – коэффициент преобразования расходомера.

Число Струхала остается постоянным в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса. Частота f_v не зависит от давления, температуры и плотности среды.

Вихревое тело обтекания обычно имеет форму треугольника (дельта-форма или призма трапецеидальной формы). Для числа $Re > 4000$, частота срыва вихрей пропорционально средней скорости потока и объемному расходу среды.

На рисунках 4.21, 4.22 приведены принципиальные конструкции вихревых расходомеров соответственно с вихреакустическим преобразователем и с пьезодатчиками. В первом случае измерение скорости среды осуществляется путем определения f_v за телом обтекания, установленном в проточной части преобразователя расхода при помощи ультразвука с частотой 1 МГц. Здесь от генератора на ПИ подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. При прохождении через поток, в результате взаимодействия с вихрями, ультразвуковые колебания модулируются по фазе. На ПП модулированные ультразвуковые колебания вновь преобразуются в напряжение, которое подается на фазовый детектор. В расходомерах с пьезодатчиками вихреобразование приводит к появлению за телом обтекания пульсаций давления среды, которые преобразуются далее в электрический сигнал.

Предел допускаемой относительной погрешности измерения расходомера составляет не более $\pm 1\%$. Для точного измерения расхода среды необходимыми условиями являются равномерность потока, т.е. длина прямого входного участка должна составлять $15 \dots 50 D_y$ (в зависимости от местного сопротивления), длина прямого выходного участка должна составлять $5 D_y$.

К достоинствам вихревых расходомеров относится:

➤ простота изготовления; низкая стоимость; высокая надежность; стабильность метрологических характеристик во времени; линейность характеристики; широкий диапазон измерения; незначительное влияние физических параметров измеряемой среды на показания прибора.

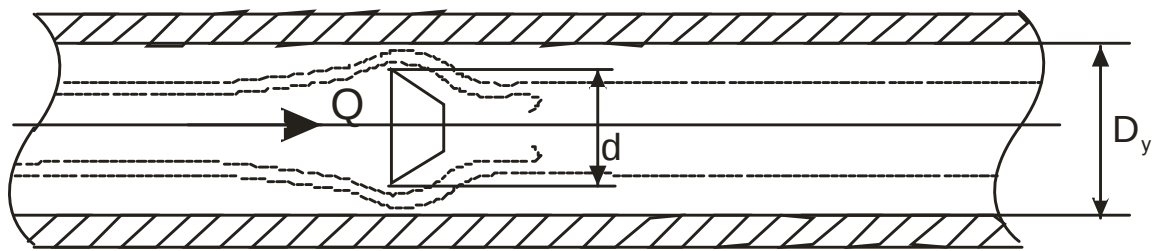


Рисунок 4.20 – Принцип работы вихревого расходомера

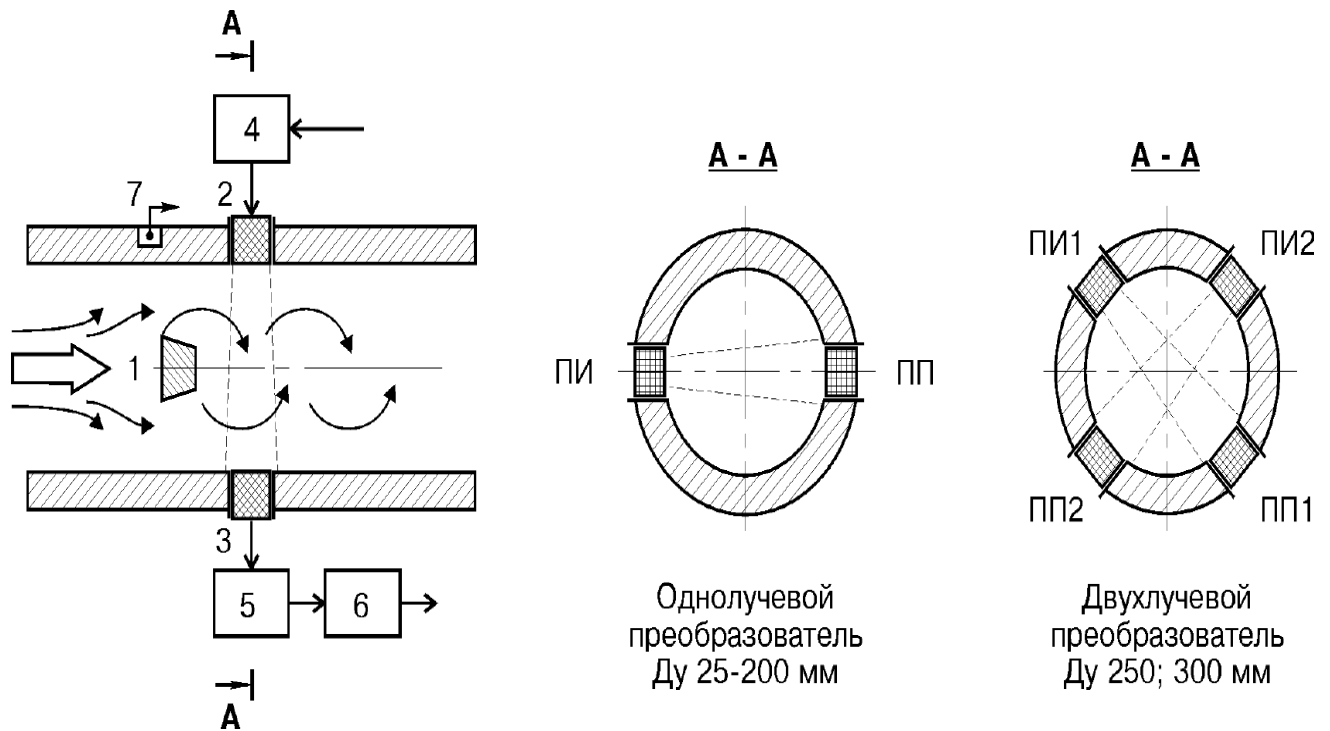


Рисунок 4.21 – Конструкция вихревого расходомера с вихревыми преобразователями:

1 – призма трапецеидального сечения; 2 – пьезоизлучатель;
3 – пьезоприемник; 4 – генератор; 5 – фазовый детектор; 6 – преобразователь сигнала; 7 – термодатчик.

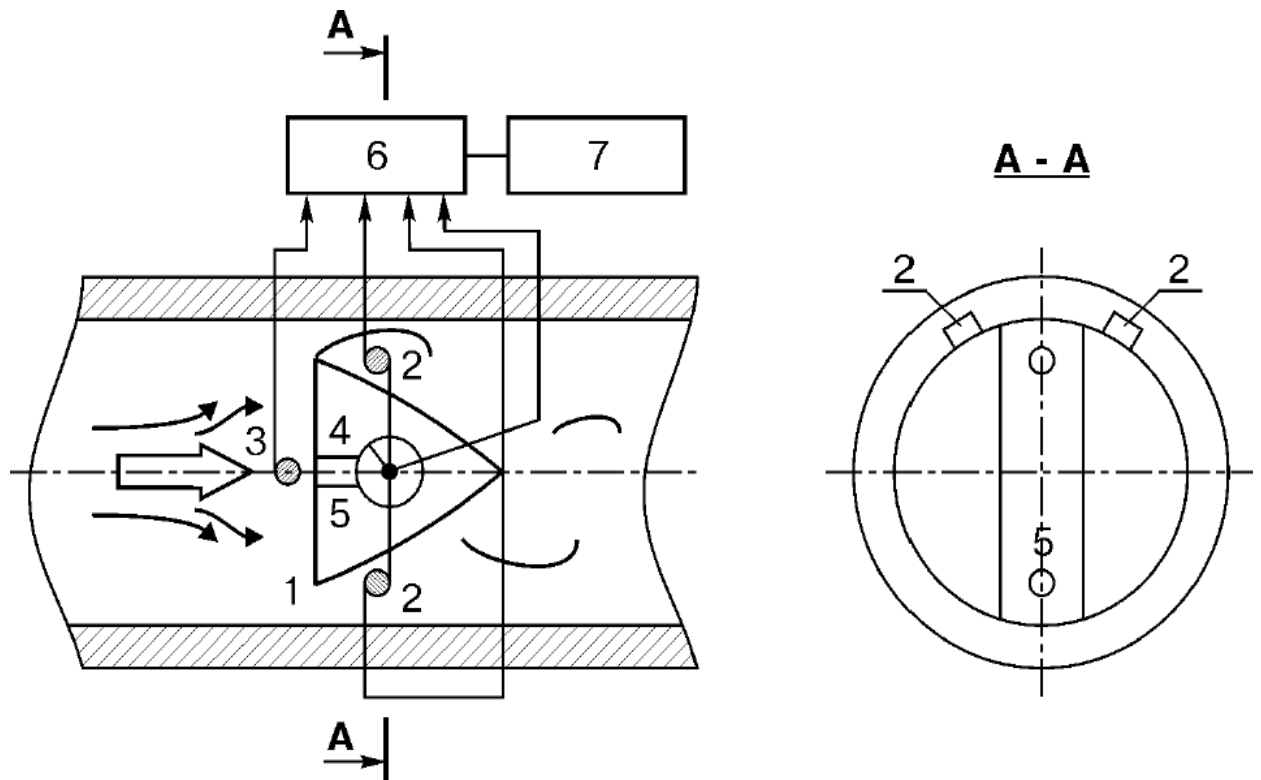


Рисунок 4.22 – Конструкция вихревого расходомера с пьезодатчиками:
 1 – теплообтекающая форма; 2 – пьезоэлектрический преобразователь пульсаций давления; 3 преобразователь избыточного давления;
 4 – платиновое термосопротивление; 5 – отверстие для контакта со средой;
 6 и 7 – преобразователи сигналов

К недостаткам необходимо отнести:

- уменьшение точности измерения при $Re < 20000$;
- неприменимы для жидкостей с высокой вязкостью;
- ограничение по диаметру (менее 25 мм не применяется из-за ограничения по Re).

Напорные трубки и расходомеры типа Аннубар. Напорная трубка измеряет динамическое давление P_d . Тогда согласно уравнения Бернулли имеем:

$$P_d = P_n - P_c = \frac{\rho V^2}{2};$$

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_n - P_c)}, \quad (4.11)$$

где P_n - полное давление в лобовой точке трубки;
 P_c - статическое давление потока.

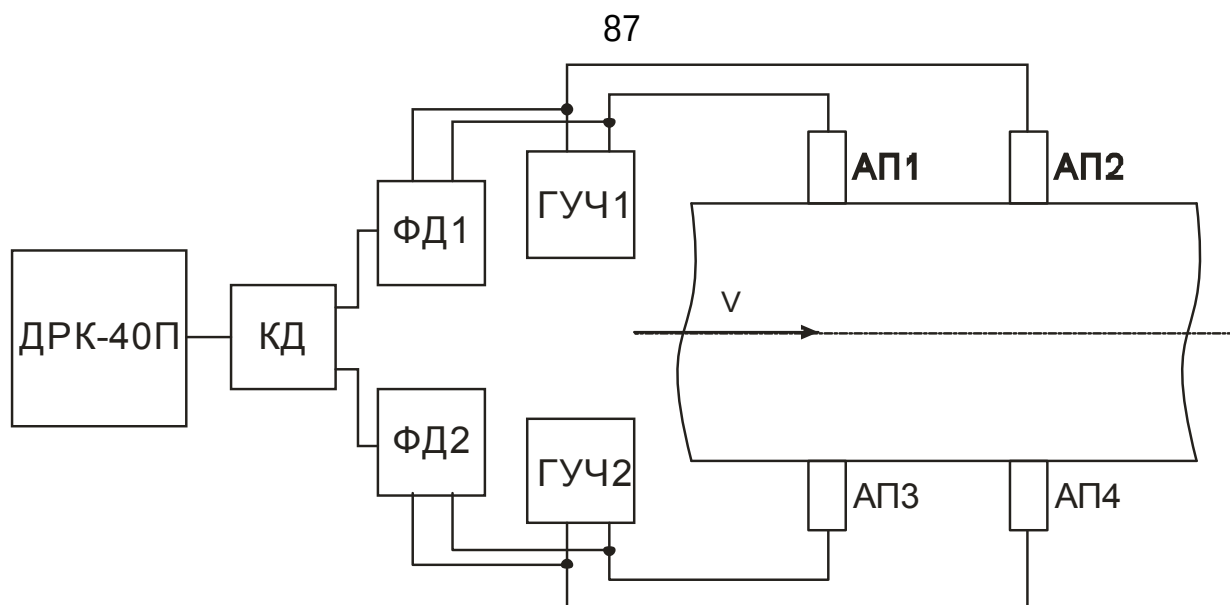


Рисунок 4.23 – Структурная схема корреляционного расходомера ДРК-4

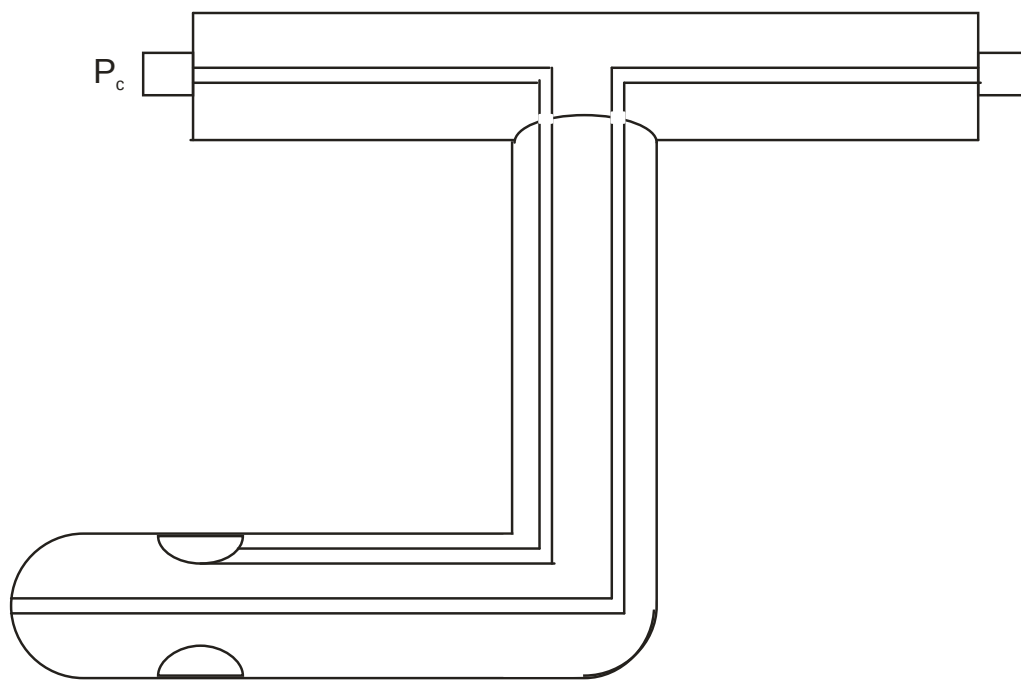


Рисунок 4.24 – Трубка Пито

Для точного измерения V вводят коэффициент ζ :

$$V = \zeta \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_n - P_c)}. \quad (4.12)$$

Коэффициент ζ определяется посредством градуировки.

Далее массовый и объемный расход среды находится как:

$$Q_m = \rho FV = \zeta F \sqrt{2\rho Pq}; \quad (4.13)$$

$$Q_0 = \zeta F \sqrt{\frac{2}{\rho} Pq}, \quad (4.14)$$

Широкое распространение получила дифференциальная трубка Пито (рисунок 4.24).

На основе напорного метода измерения расхода среды разработаны расходомеры типа Анньюбар. На рисунке 4.25 приведены конструкции датчика данного расходомера.

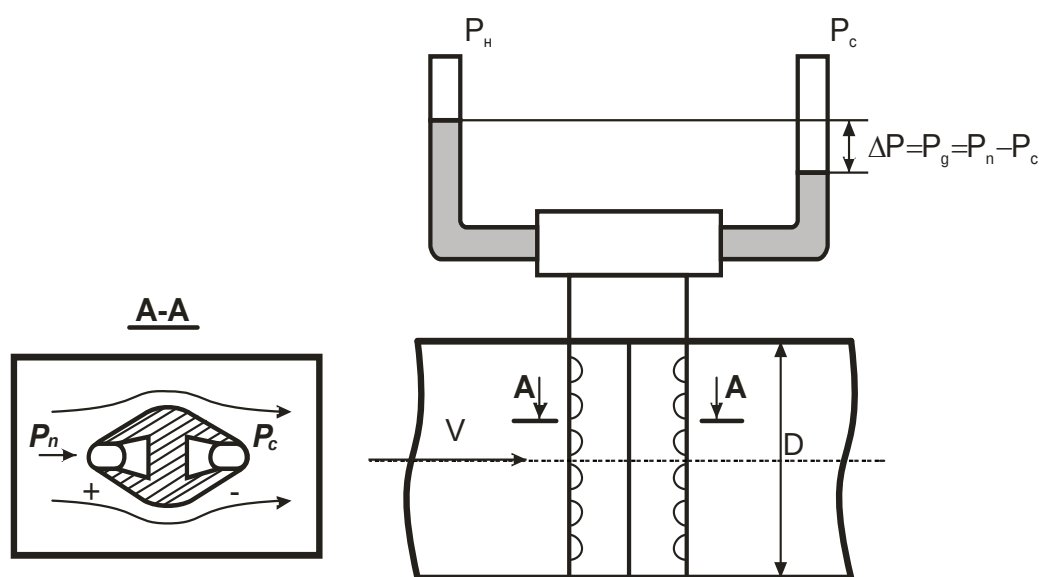


Рисунок 4.25 – Датчик расхода типа Анньюбар

Сенсор вставляется по диаметру в трубу в протекающий поток. Число отверстий в сенсоре зависит от диаметра трубопровода. Относительная погрешность измерения составляет 1% при изменении скорости потока в диапазоне 10:1.

Основными преимуществами расходомеров типа Анньюбар по сравнению с методом переменного перепада давления является низкая стоимость установки и низкая потеря давления (в десятки раз).

Достоинства расходомера:

- низкая стоимость;
- простота установки;
- низкие потери давления;
- стабильность характеристики;
- простота поверки.

Недостатки расходомера:

- уменьшение точности измерения при $Re < 20000$;

➤ Не применим для жидкостей с высокой вязкостью.

Для точного измерения расхода среды необходимо соблюдение условий по размерам входного и выходного участков трубопровода соответственно до и после датчика Анньюбар, то есть длина входного участка после местного сопротивления не должна быть меньше $10...30D_y$, а выходного участка после датчика не менее $4D_y$.

Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве. Уравнения расхода для несжимаемой и сжимаемой среды. Правила установки, погрешность измерений. Измерение расхода среды по динамическому напору. Правила установки расходомеров типа Анньюбар. Погрешность измерений. Электромагнитные расходомеры с постоянным и переменным магнитным полем. Конструктивное исполнение. Погрешность измерений. Вихревые расходомеры. Принцип действия. Вихревые расходомеры с пьезометрическим и вихреакустическим преобразователем. Погрешность измерений.

Тема 4.3. Ультразвуковые расходомеры. Корреляционные расходомеры. Кориолисовый расходомер. Теплосчетчики

Ультразвуковые расходомеры. Применяются для измерения расхода жидкостей и газов. Метод измерения основан на явлении смещения звукового колебания движущейся средой. Если колебания распространяются в направлении движения потока, то они тем быстрее достигают заданной точки, чем больше скорость потока V . Время прохождения звуковым колебанием расстояния L между излучателем и приемником:

$$\tau = \frac{L}{c+V}, \quad (4.14)$$

где c - скорость звука в среде.

Расходомеры, основанные на измерении τ имеют существенную ошибку, связанную с колебаниями скорости звука c , а также значительно меньшим влиянием V среды на определение τ , чем c звука.

Поэтому целесообразно измерять $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2,$$

где τ_1 – время прохождения расстояния L при распространении колебаний по потоку,

τ_2 – время прохождения расстояния L при распространении колебаний против потока.

$\Delta\tau$ определяют:

➤ фазовым методом по изменению разности фазовых сдвигов ультразвуковых колебаний.

- частотно-импульсным методом по изменению разности частот повторения коротких импульсов, направленных одновременно по потоку и против него.
- время-импульсным методом по изменению разности времени прохождения коротких импульсов, направленных одновременно по потоку и против него.

Фазовый метод (рисунок 4.26).

При $V \neq 0$ величина сигнала, передающегося по направлению потока:

$$E_1 = A \sin \omega \tau,$$

где A - амплитуда сигнала;

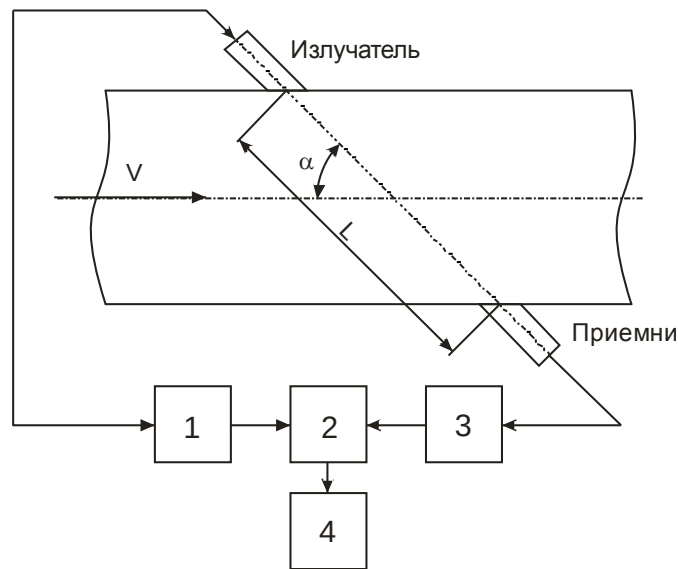


Рисунок 4.26 – Схема ультразвукового расходомера:
1 — генератор; 2 – фазометр; 3 – усилитель-преобразователь;
4 – измерительный прибор

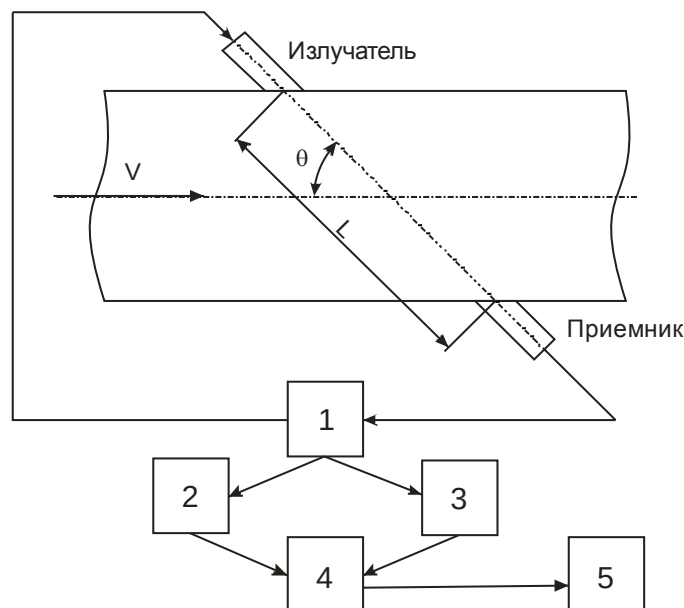


Рисунок 4.27 – Схема ультразвукового расходомера:

1 – переключатель; 2 – генератор; 3 – усилитель-преобразователь;
4 – фазометр; 5 – измерительный прибор

ω - частота сигнала.

Принятые приемником колебания будут задерживаться на время

$$\tau_3 = \frac{L}{c + V \cos \theta}.$$

Принятый сигнал

$$E_2 = K A \sin \left(\omega \tau - \frac{\omega L}{c + V \cos \theta} \right),$$

где K - коэффициент затухания ультразвуковых колебаний.

Разность фазовых углов:

$$\Delta \varphi = \omega \tau - \left(\omega \tau - \frac{\omega L}{c + V \cos \theta} \right) = \frac{\omega L}{c + V \cos \theta},$$

т.к. $V/c \ll 1$ ($c = 1000 \div 1500$ м/с), или

$$\Delta \varphi = \frac{\omega L}{c + V \cos \theta} \cong \frac{\omega L}{c} - \frac{\omega V \cos \theta L}{c^2}, \quad (4.15)$$

где $\frac{\omega L}{\tilde{n}}$ - стационарный фазовый сдвиг (при $V = 0$);

$\frac{\omega V \cos \theta L}{c^2}$ - фазовый сдвиг, обусловленный движением среды.

Если частота ω изменится хотя бы на 0,1 %, то это вызовет изменение стационарного фазового сдвига в 10 раз больше, чем изменится дополнительный фазовый сдвиг. Поэтому необходимо нейтрализовать изменение стационарного фазового сдвига. Для этого излучатель и приемник обмениваются функциями (рисунок 4.27).

При излучении по потоку:

$$\Delta \varphi_1 = \frac{\omega L}{c} - \frac{V \cos \theta \omega L}{c^2}. \quad (4.16)$$

При излучении против потока

$$\Delta \varphi_2 = \frac{\omega L}{c} + \frac{V \cos \theta \omega L}{c^2} \quad (4.17)$$

и

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = \left| \frac{2V \cos \theta \omega L}{c^2} \right|. \quad (4.18)$$

Тем самым исключается стационарный фазовый сдвиг.

Частотно - импульсный метод

При $V = 0$ время распространения ультразвука от излучателя до приемника:

$$\tau = L/c.$$

При $V_{cp} \neq 0$ составляющая скорости потока по направлению передачи колебаний:

$$V_1 = V \cdot \cos \theta.$$

Время прохождения ультразвука между генераторами при излучении по движению потока:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + V \cos \theta}. \quad (4.19)$$

При излучении против движения потока:

$$\tau_2 = \frac{L}{c - V \cos \theta}. \quad (4.20)$$

Частота повторения импульсов: при направлении ультразвука по потоку.

$$f_1 = 1/\tau_1$$

и

$$f_2 = 1/\tau_2$$

при направлении ультразвука против потока.

Разность частот:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{c + V \cos \theta}{\alpha} - \frac{c - V \cos \theta}{\alpha} = \frac{2V \cos \theta}{L} \quad (4.21)$$

Таким образом, скорость звука не сказывается на измерении Δf . Схема реализации метода аналогична рисунку 4.27.

Время - импульсный метод

Принцип действия основан на измерении разности времени прохождения коротких импульсов по направлению скорости потока V и против него.

$$\Delta\tau = \frac{2LV \cos \theta}{c^2}. \quad (4.22)$$

Из-за сложности реализации не нашел применения.

Основным элементом ультразвукового расходомера является измерительный участок с установленным электроакустическим преобразователем (ЭАП). Измерительные участки поставляются с врезанными или накладными ЭАП. Для трубопроводов с диаметром < 50 мм измерительный участок имеет U – образную форму (рисунок 4.28)

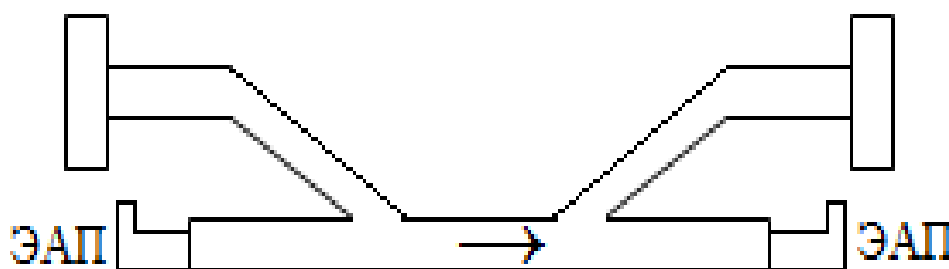


Рисунок 4.28 – U – образный измерительный участок.

Для трубопроводов диаметром > 50 мм на измерительном участке ЭАП могут устанавливаться по диаметру (рисунок 4.29а), по хордам (рисунок 4.29б) или быть накладными (рисунок 4.29в).

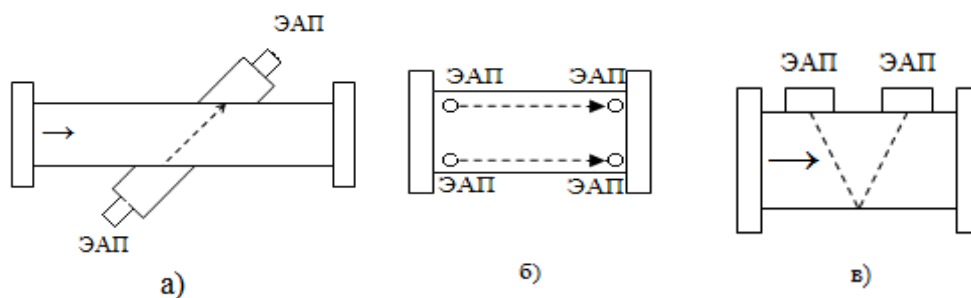


Рисунок 4.29 – Исполнение измерительных участков.

Внутренняя поверхность измерительных участков обрабатывается покрытием типа «эпобен», нефтьэкор.

К достоинствам ультразвуковых расходомеров можно отнести:

- возможность измерения расхода любых жидкостей;
- возможность измерения расходов близких к 0;
- высокое быстродействие;
- отсутствие контакта со средой;

➤ отсутствие потери давления.

Корреляционные расходомеры. Корреляционный метод измерения расхода основан на определении времени θ прохождения случайными неоднородностями потока некоторого расстояния между двумя точками трубопровода, где эти неоднородности детектируются. В виде случайных неоднородностей потока можно выделить турбулентные неоднородности (ультразвуком)

$$\theta = L/V, \quad (4.23)$$

где V - скорость перемещения неоднородностей;

L - расстояние между сечениями.

Так как V измеряется не по всему сечению трубопровода, а лишь по его диаметру, то

$$V = \zeta \bar{V},$$

где ζ - коэффициент расхода;

$\bar{V}$ - средняя скорость потока ($\bar{V} = Q/S$),

и

$$Q = LS / \zeta \theta. \quad (4.24)$$

Здесь θ определяется как время задержки τ , при котором взаимокорреляционность фазовых сигналов X_1 , X_2 с двух детекторов достигает максимума, то есть если

$$R_{X_1, X_2}(\tau) = \frac{1}{2} \int_{nT}^{(n+1)T} X_1(t) X_2(t - \tau) dt, \quad (4.25)$$

то $Q = \tau$ при $R_{X_1, X_2}(\tau) \rightarrow \max$ в конце интервала T .

На рисунке 4.23 представлена структурная схема корреляционного расходомера ДКР-4.

Принцип действия ДКР-4 основан на корреляционной дискретизации времени прохождения случайными флуктуациями расстояния между двумя парами ультразвуковых акустических преобразователей АП1-АП4, которые излучают ультразвуковые колебания. Эти колебания, проходя через жидкость, порождают вторичные электрические колебания на АП1 и АП2. Из-за взаимодействия вторичных ультразвуковых лучей с неоднородностью потока электрические колебания на АП оказываются модулированными. Эти колебания поступают на фазовые детекторы ФД1 и ФД2 и далее на корреляционный

дискриминатор КД. Класс точности данного расходомера составляет 1,5 (при $V = 0,5 \dots 5 \text{ м/с}$) и 2 (при $V = 5 \dots 10 \text{ м/с}$).

Кориолисовые расходомеры. Данные расходомеры измеряют массовый расход путем измерения временной задержки между сигналами детекторов. Основными элементами датчика кориолисового расходомера являются (см. рисунок 4.30):

- расходомерные (сенсорные) трубки;
- соединительная коробка с силовой электромагнитной катушкой возбуждения и милливольтметром;
- два тензодатчика с магнитами и электромагнитными катушками.

Принцип работы расходомера основан на эффекте Кориолиса - поступательное движение среды во вращательном движении сенсорной трубки приводит к возникновению кориолисового ускорения, которое приводит к появлению кориолисовой силы. Эта сила направлена против движения трубки, придаваемого ей задающей катушкой, т.е. когда трубка движется вверх во время половины ее собственного цикла, то для жидкости, поступающей внутрь, сила Кориолиса направлена вниз. Как только жидкость проходит изгиб трубки, направление силы меняется на противоположное. Таким образом, во входной половине трубки сила, действующая со стороны жидкости, препятствует смещению трубки, а в выходной способствует. Это приводит к изгибу трубки. Когда во второй фазе вибрационного цикла трубка движется вниз, направление изгиба меняется на противоположное. То есть под воздействием задающей катушки расходомера трубка колеблется с резонансной частотой, и при движении среды в колеблющейся трубке различные ее части колеблются друг относительно друга. Этот изгиб приводит к взаимному рассогласованию по фазе колебаний различных участков расходомерной трубки, которое преобразуется электромагнитным детектором скорости в выходной сигнал датчика расхода.

Детектором измеряют фазовый сдвиг при движении противоположных сторон сенсорной трубки. Как результат изгиба сенсорных трубок генерируемые детекторами сигналы не совпадают по фазе, так как сигнал от входной стороны запаздывает по отношению к сигналу с выходной стороны. Разность во времени между сигналами ΔT (смотри рисунок 4.31) пропорциональна массовому расходу.

Резонансная частота трубки зависит от ее диаметра, материала, конструкции и массы. Масса трубки постоянна для данного датчика. Поскольку масса среды в трубке равна $\rho_{cp} \cdot V_{cp}$, а $V_{cp} = const$, то частота резонансных колебаний трубки может быть привязана к плотности среды и определена путем измерения частоты резонансных колебаний, периода колебаний трубки и температуры.

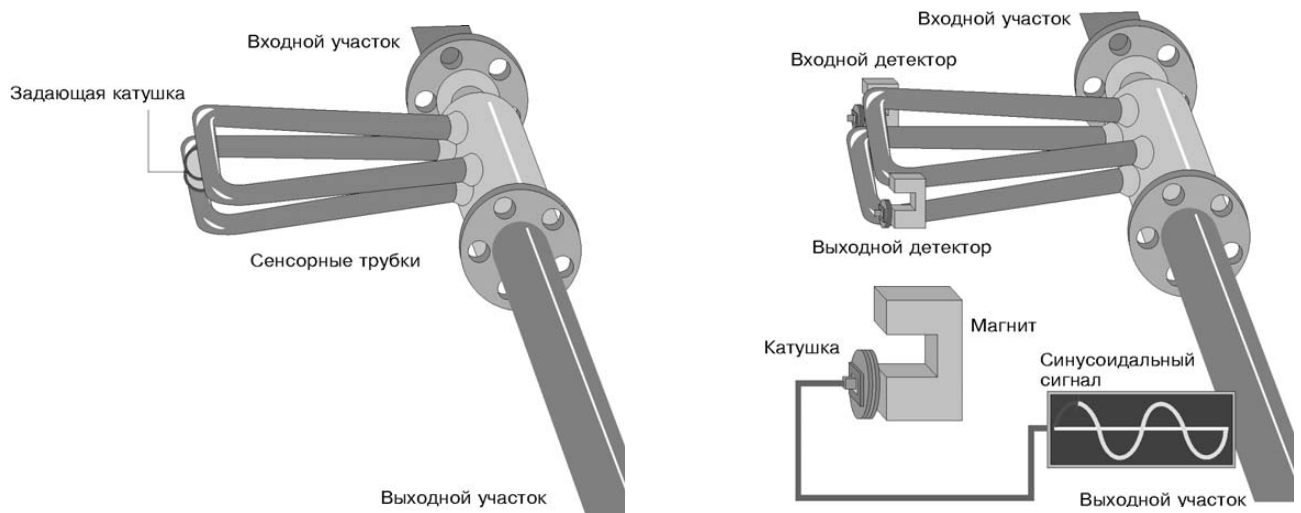


Рисунок 4.30 – Кориолисовый расходомер

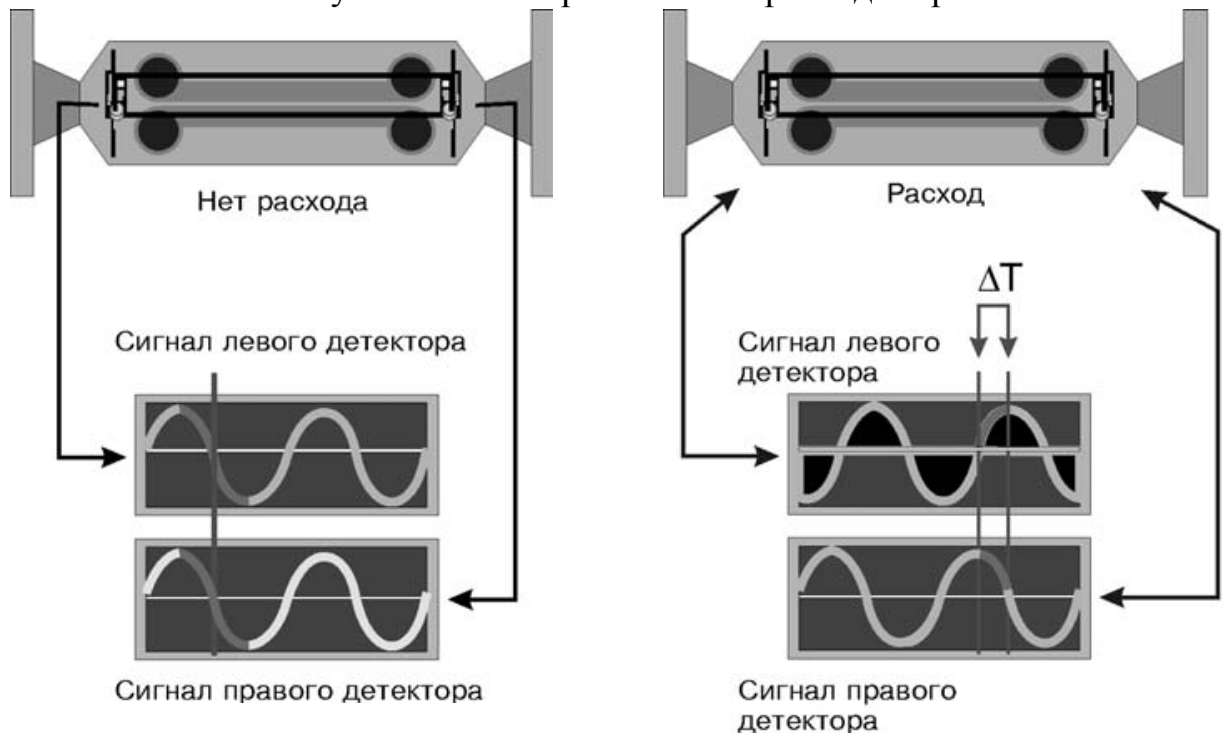


Рисунок 4.31 – Фазовый сдвиг при движении сенсорных трубок

Тема 4.4. Измерение уровня жидкости

Уровнем называют высоту заполнения технологического аппарата рабочей средой - жидкостью или сыпучим телом. Он является технологическим параметром, информация о котором необходима для контроля режима работы технологического аппарата или для управления производственным процессом. Уровень измеряют в единицах длины, иногда в процентах.

Широкий круг задач, связанных с измерением и регулированием уровня в технологических процессах, обусловил появление большого числа различных приборов и устройств, основанных на разных принципах действия. Приборы для измерения и регулирования уровня можно классифицировать по следующим показателям:

- по принципу действия - на поплавковые, буйковые, емкостные, гидростатические, ультразвуковые, радиоволновые, акустические, радиоизотопные, гравитационные и т.п.;

- по характеру измеряемой среды - на приборы для измерения уровня жидких сред, сыпучих тел или уровня раздела двух жидкостей с различной плотностью;

- по способу взаимодействия датчиков с контролируемой средой методы измерения можно разделить на контактные и бесконтактные;

- по степени воздействия измеряемой среды - на приборы для измерения агрессивных или неагрессивных сред;

- по функциональному назначению их можно разделить на две группы. К первой относятся приборы дискретного контроля достижения какого-то одного или нескольких заранее заданных и жестко зафиксированных значений уровня - сигнализаторы; ко второй - приборы непрерывного контроля уровня - уровнемеры, которые могут оснащаться устройствами для выполнения таких задач, как: визуальное считывание показаний; сигнализация о достижении предельных значений уровней в схемах автоматики безопасности, технологической сигнализации и управления, непрерывной передачи показаний об уровне в системы контроля количества и расхода вещества и (или) в автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Поплавковые и буйковые уровнемеры. Поплавковые и буйковые уровнемеры являются простыми и надежными устройствами. В зависимости от их типа и модификации можно осуществлять местные и дистанционные измерения, регулирование, сигнализацию уровня различных жидкостей, включая и агрессивные. Поплавковые уровнемеры используют для измерения уровня жидкости в различных резервуарах, находящихся под атмосферным или небольшим избыточным давлением. На ТЭС уровнемеры данного типа нашли применение для измерения уровня нефтепродуктов, масел и других жидких сред в резервуарах и баках.

На рисунок 4.32 изображена схема поплавкового уровнемера, который представляет собой поплавок 1, выполненный из нержавеющей стали, связанный с противовесом 4 гибким тросом 2. В нижней части противовеса закреплена стрелка, указывающая по шкале 3 значение уровня жидкости в резервуаре. При расчетах поплавковых уровнемеров подбирают такие конструктивные параметры поплавка, которые обеспечивают состояние равновесия системы “поплавок-противовес” только при определенной глубине погружения поплавка. Повышение уровня жидкости изменяет глубину погружения поплавка и на него действует дополнительная выталкивающая сила. В результате равенство нарушается и противовес спускается вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1 . При понижении уровня действующая на поплавок выталкивающая сила уменьшается и поплавок начинает опускаться вниз до тех пор, пока глубина его погружения опять не станет равной h_1 . Значение уровня либо указывается стрелкой на шкале, либо преобразуется в преобразователе угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

Для дистанционного измерения уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, широкое применение находят буйковые уровнемеры. Их принцип действия основан на измерении выталкивающей силы, действующей на буюк и зависящей от степени погружения буйка в жидкость (закон Архимеда), т.е. от уровня жидкости. Измерение выталкивающей силы производится по уравновешивающему усилию, развиваемому устройством обратной связи. Различают электро- и пневмосиловые устройства обратной связи с электрическим (УБ-Э) или пневматическим (УБ-П) унифицированным выходным сигналом. Кроме уровнемеров выпускается много разновидностей поплавковых и буйковые сигнализаторов уровня.

Современная электроника позволяет встраивать уровнемеры в АСУ ТП любой сложности. Ниже приведена конструкция современного буйкового уровнемера (рисунок 4.33)

Буйковый уровнемер состоит из сенсора уровня и контроллера.

Сенсор уровня состоит из камеры, поплавка, вала, торсионной трубки и подвесного вала (смотри рисунок 4.33).

При изменении уровня жидкости (уровня поверхности раздела сред) или плотности жидкости происходит смещение буйка, которое приводит к повороту торсионной трубки (угол поворота пропорционален изменению выталкивающей силы, моменту силы, действующей на буюк). Поворотное движение торсионной трубки передается на цифровой контроллер, который преобразует угол поворота в электрический сигнал. Кроме аналогового сигнала 4-20 мА, который подается на выход, контроллер может передавать информацию в цифровом виде, что позволяет пользователю легко получить доступ к информации, которая может быть критической для данного технологического процесса.

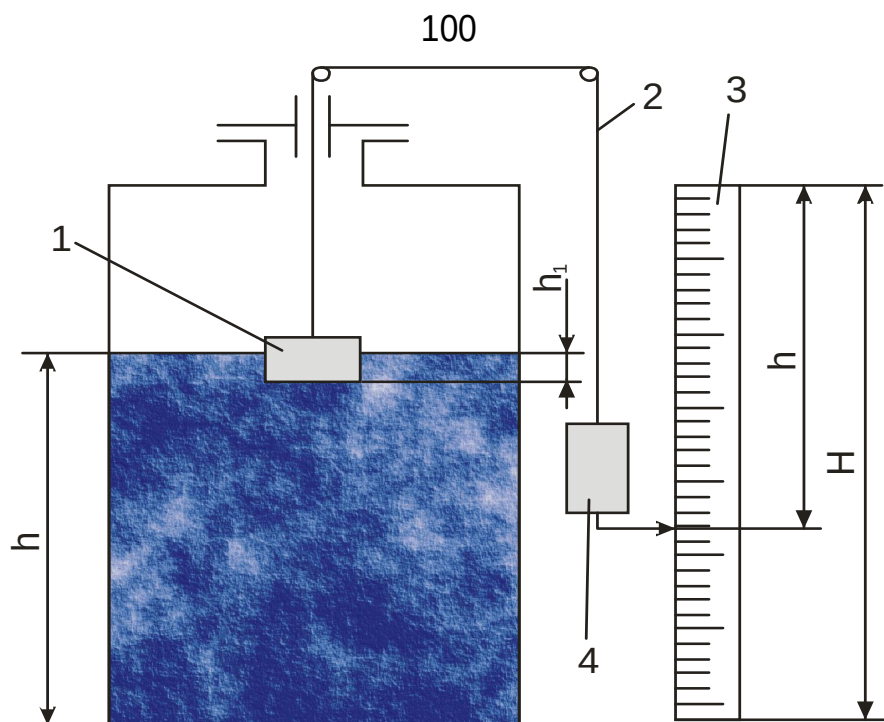


Рисунок 4.32 – Схема поплавкового уровнемера

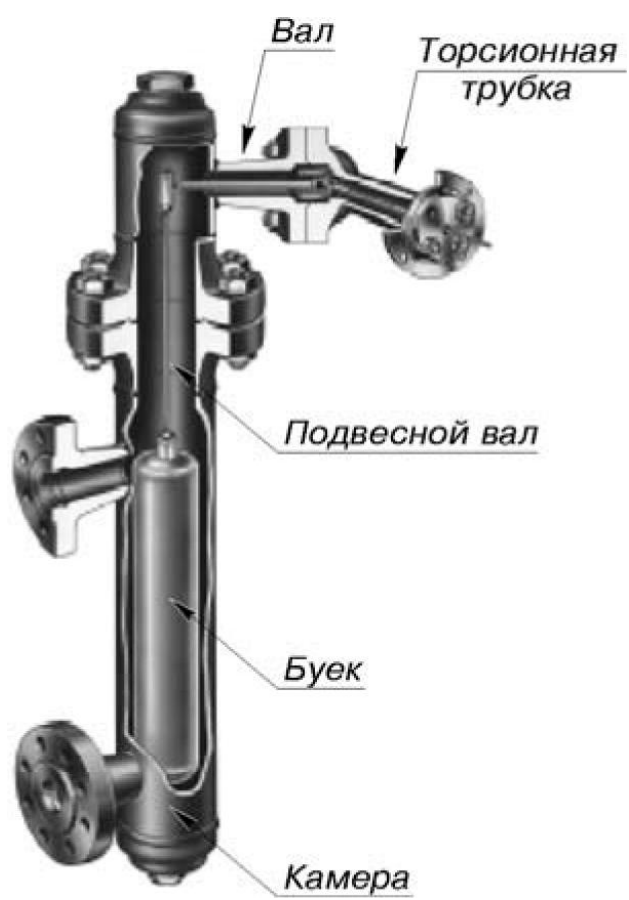


Рисунок 4.33 – Буйковый уровнемер

Волноводные уровнемеры.. Волноводные уровнемеры – это новые интеллектуальные приборы, построенные на основе волноводной технологии и обеспечивающие надежные измерения уровня и взвесей в сложных условиях эксплуатации. Принцип их действия заключается в следующем.

Микроволновые радиоимпульсы малой мощности направляются вниз по зонду, погруженному в технологическую среду, уровень которой нужно определить. Когда радиоимпульс достигает среды с другим коэффициентом диэлектрической проницаемости, из-за разности коэффициентов диэлектрической проницаемости воздуха и жидкости происходит отражение микроволнового сигнала в обратном направлении. Временной интервал между моментом передачи зондирующего импульса и моментом приема эхо-сигнала пропорционален расстоянию до уровня контролируемой среды. Аналогичным образом измеряется расстояние между датчиком и границей раздела двух жидких сред с различными коэффициентами диэлектрической проницаемости.

Интенсивность отраженного сигнала зависит от диэлектрической проницаемости среды. Чем выше диэлектрическая проницаемость, тем выше интенсивность отраженного сигнала. Радарный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерения уровня: радиоимпульсы практически невосприимчивы к составу среды, атмосфере резервуара, температуре и давлению. В современных датчиках для удобства применения и обслуживания в различных условиях применяют следующие принципы и конструкторские решения:

- модульность конструкций;
- усовершенствованная аналоговая и цифровая обработка сигнала;
- возможность использования зондов нескольких типов в зависимости от условий применения датчика;
- подключение двухпроводным кабелем (питание подается по сигнальному контуру);
- поддержка коммуникационного цифрового протокола HART, что обеспечивает вывод данных в цифровом виде и возможность дистанционной настройки прибора.

Поскольку радиоимпульсы направляются по зонду, эта технология измерения может с успехом применяться для малых и узких резервуаров, а также для резервуаров с узкими горловинами.

Съемная головка датчика позволяет заменять модуль электроники, не нарушая герметичности резервуара, что может быть важно при измерении уровня сжиженных газов и аммиака. Электроника датчика и клеммная колодка для подключения кабеля расположены в отдельных отсеках корпуса. Головка датчика имеет возможность поворота на 360° для размещения индикатора в удобном положении.

Точность и надежность измерений одним датчиком двух параметров уровня внешней поверхности и уровня раздела двух жидких сред обеспечивается:

- технологией динамической оптимизации коэффициента усиления;

➤ последующей цифровой обработкой сигнала микропроцессорной электроникой датчика.

Емкостные уровнемеры. Емкостные уровнемеры, наряду с кондуктометрическими, относятся к электрическим средствам измерения уровня. В уровнемерах этого типа используется зависимость электрической емкости чувствительного элемента первичного измерительного преобразователя от изменения уровня контролируемой среды вдоль оси датчика. Измерение электрической емкости датчика производится индуктивно-емкостным мостом. С изменением уровня измеряемой среды вдоль оси датчика меняется его электрическая емкость, что приводит к нарушению равновесия моста и появлению на его выходе сигнала разбаланса, пропорционального уровню измеряемой среды.

Конструктивно емкостные чувствительные элементы выполняют в виде коаксиально расположенных цилиндрических электродов или параллельно расположенных плоских электродов. На рисунке 4.34. представлен чувствительный элемент емкостного уровнемера с коаксиально расположенными электродами 1 и 2, частично погруженными в жидкость. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, межэлектродное пространство которого до высоты h заполнено жидкостью, а пространство $H-h$ парогазовой смесью. Для фиксирования взаимного расположения электродов предусмотрен изолятор 3.

В комплект емкостного уровнемера входит электронный блок, датчик, показывающий прибор, соединительный радиочастотный кабель, возможно подсоединение записывающего потенциометра. Выпускаются уровнемеры с минимальным диапазоном измерений 0-0,4 м, с максимальным 0-20 м с параметрами рабочей среды: температура от -60 до 250°C; давление 2,5 - 10 МПа. На базе емкостных чувствительных элементов разработаны взрывобезопасные сигнализаторы уровня раздела жидкостей “нефтепродукт-вода” и других жидкостей.

Бесконтактные уровнемеры. Уровнемеры данного типа позволяют производить измерение уровня, не вступая в непосредственный контакт с измеряемым продуктом. К основным уровнемерам данного типа относятся акустические, ультразвуковые и радарные.

Акустические и ультразвуковые уровнемеры. В настоящее время предложены различные принципы построения акустических уровнемеров, из которых широкое применение получил принцип локации. Мерой уровня в данном случае является время прохождения ультразвуковыми колебаниями расстояния от излучателя до границы раздела двух сред и обратно до приемника излучения. Локация границы раздела двух сред осуществляется либо со стороны газа, либо со стороны рабочей среды (жидкости или сыпучего материала). Уровнемеры, в которых локация границы раздела двух сред осуществляется через газ, называют акустическими, а уровнемеры с локацией границы раздела двух сред через слой рабочей среды - ультразвуковыми.

На рисунке 4.35 приведена схема акустического уровнемера жидких сред. Он состоит из первичного “А” и промежуточного “В” преобразователей. Первичный преобразователь представляет собой пьезоэлемент, который одновременно

выполняет функции источника и приемника ультразвуковых колебаний. При измерении генератор 9 вырабатывает электрические импульсы, которые пьезоэлементом "А" преобразуются в ультразвуковые импульсы. Эти импульсы распространяются вдоль акустического тракта, отражаются от границы раздела жидкость-газ и воспринимаются тем же пьезоэлементом, который преобразует их в электрические импульсы. После усиления устройством 1 импульсы подаются на схему измерения времени отражения сигнала 2. В ячейке сравнения 3 осуществляется сравнение измеренного импульса с длительностью импульса, подаваемого с элемента обратной связи 5. Если длительности импульсов различны на выходе ячейки сравнения появляется сигнал разбаланса, который усилительно-преобразующим устройством 4 изменяет выходной унифицированный токовый сигнал до тех пор, пока не будет достигнуто равенство импульсов. В промежуточном преобразователе "В" предусмотрен также блок контроля за работой электрической схемы 7, помехозащитное устройство 6, блок температурной компенсации 8. Расстояние между первичным и промежуточным преобразователями должно быть не более 25 м. Диапазоны измерения уровня 0-1; 0-2; 0-3м. К достоинствам акустических уровнемеров можно отнести независимость их показаний от физико-химических свойств и состава рабочей среды. Это позволяет использовать их для измерения уровня неоднородных кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей. К недостаткам следует отнести влияние на показания уровнемеров температуры, давления и состава газа. Кроме того, звуковые волны практически любой частоты интенсивно затухают в воздухе. В последнее время получили применение уровнемеры использующие электромагнитные волны, которые в отличие от звуковых распространяются в воздушной среде с существенно меньшим затуханием. Радиоволновые уровнемеры нашли применение для измерения уровня в резервуарах кислот, щелочей и других агрессивных жидкостей, используемых в химцехах ТЭС.

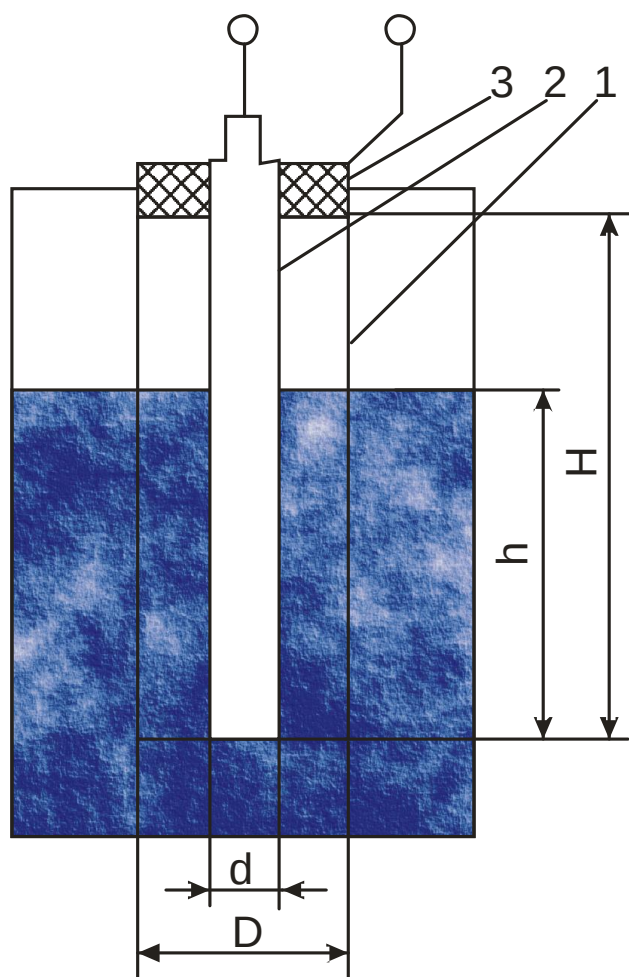


Рисунок 4.34 – Схема электрического емкостного уровнемера

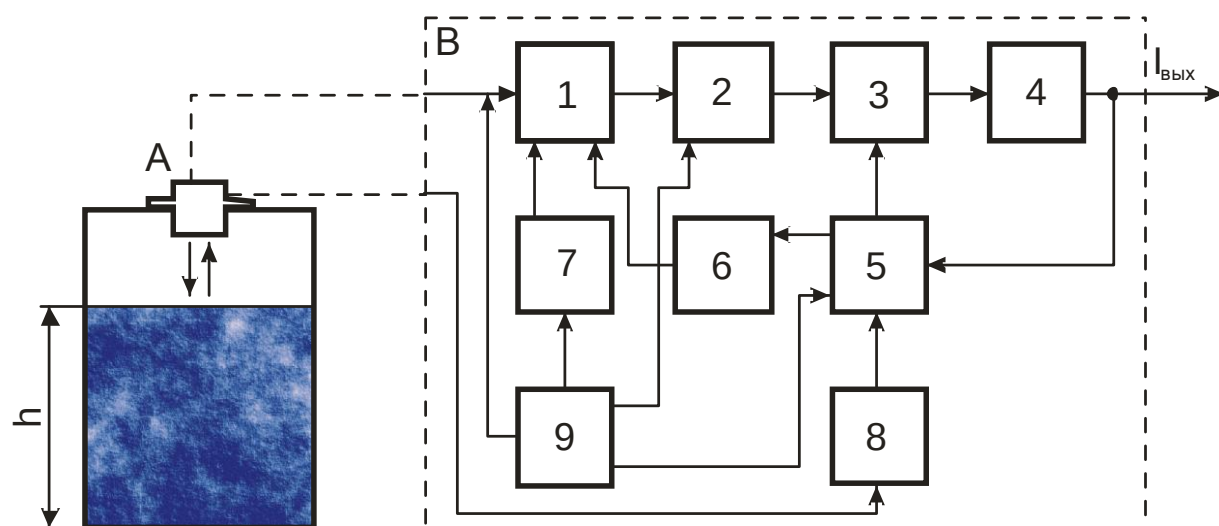


Рисунок 4.35 – Схема акустического уровнемера жидких сред

Радарные уровнемеры. Радарные уровнемеры обладают высокой надежностью и точностью измерений, не имеют в своем составе частей, непосредственно контактирующих с измеряемым продуктом, не требуют технического обслуживания, радарный луч свободно проникает через слои пены и изолирующие прокладки, на него не влияют изменения объема заполненного парами пространства резервуара.

Уровень жидкости измеряется короткими импульсами радара, которые передаются от антенны, находящейся в верхней части резервуара, по направлению к этой жидкости.

Когда импульс радара достигает среды с иной диэлектрической постоянной, часть энергии отражается обратно к датчику. Разница во времени между переданным и отраженным импульсом пропорциональна расстоянию, от которого рассчитывается уровень. Используемая технология обработки сигнала обеспечивает высокоэффективное подавление паразитных отражений, а также помех, связанных с волнением поверхности измеряемого продукта и загрязнениями антенны датчика уровня. Таким образом, можно с высокой точностью вычислить расстояние до продукта и уровень продукта в резервуаре (рисунке 4.36).

Уровеньмер состоит из датчика, соединения с резервуаром и антенны. Соединение с резервуаром и антенна являются единственными деталями, которые контактируют с атмосферой резервуара.

Корпус датчика, изготовленный из литьевого алюминия, состоит из двух отделений. В одном отделении содержится электроника, в другом клеммы повышенной влагоустойчивости. Датчик можно снимать, не открывая резервуар, что улучшает защиту и облегчает обслуживание. В корпусе имеется два входа для кабельных соединений (рисунок 4.37).

Важной особенностью в радарных измерениях является сфокусированное направленное излучение радиоволн, которое позволяет минимизировать требования к установке прибора на резервуаре. Такой показатель как диаметр измерительного «пятна» D контакта особенно важен при наличии в резервуаре дополнительных устройств и оборудования (лестницы, лопасти мешалок, обогреватели и т.п.). Угол радиолуча зависит от типа и размера применяемой при измерениях антенны. Значение угла радиолуча необходимо знать и использовать с целью исключения попадания в зону его распространения различных предметов и элементов конструкции резервуара, способных повлиять на максимально эффективные измерения уровня. При измерении на расстоянии L участвует поверхность продукта, попадающая в «пятно» с центром, соответствующим оси датчика уровня (смотри рисунок 4.38), что позволяет при расчетах проводить эффективное усреднение даже при наличии волн на поверхности.

Радарный уровнемер представляет собой сложный прибор, предназначенный для проведения бесконтактных измерений уровня различных продуктов в промышленных, складских и прочих резервуарах.

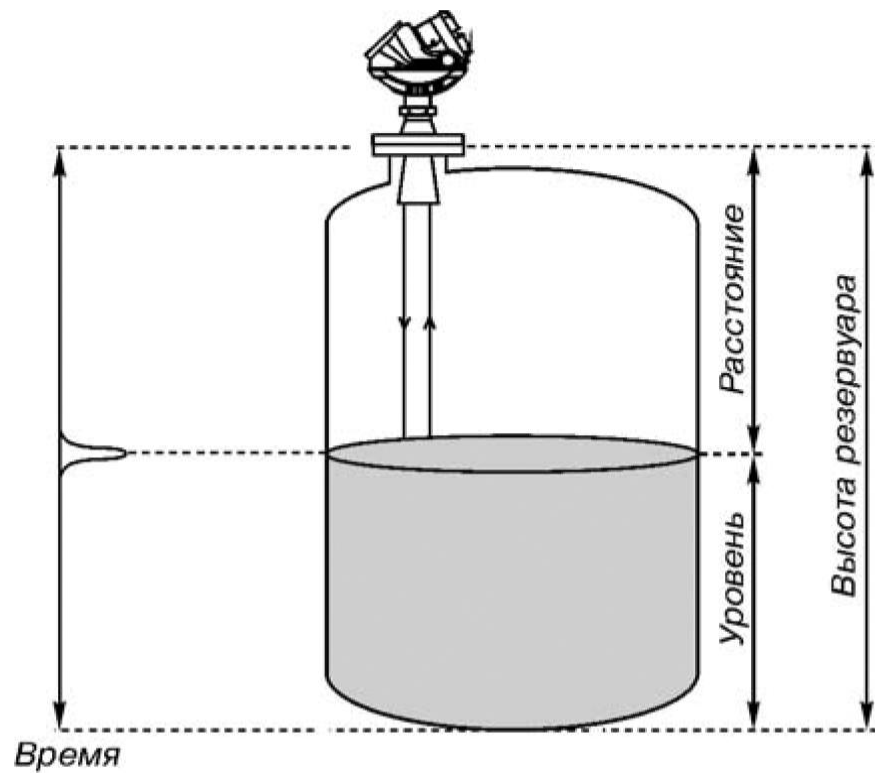


Рисунок 4.36 – Принцип действия радарного уровнемера

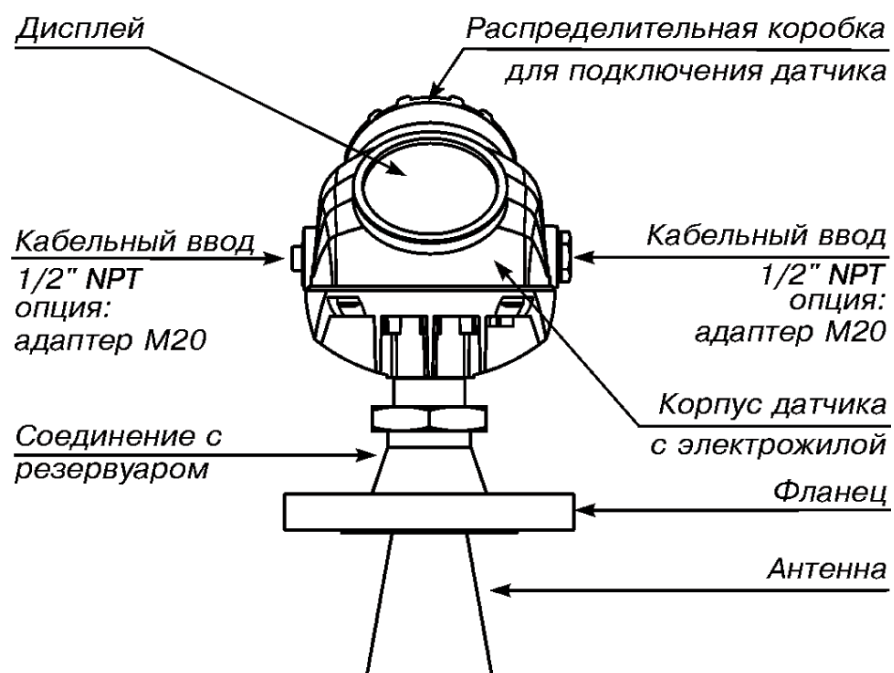


Рисунок 4.37 – Конструкция радарного уровнемера

Уровнемер предусматривает возможность работы, как в автономном режиме, так и в составе систем АСУТП. В процессе работы уровнемера значения об уровне наполнения резервуара передаются в виде аналогового сигнала 4-20 мА с наложенным цифровым сигналом. Чтобы в полном объеме использовать возможности радарного уровнемера, необходимо перед вводом в эксплуатацию провести его правильное конфигурирование (настройку). Для этой цели обычно используется специально разработанное программное обеспечение, позволяющее при помощи персонального компьютера осуществлять операции конфигурирования, производить запись результатов измерений в журнал, осуществлять расширенную оперативную помощь и т.д. (рисунок 4.39).

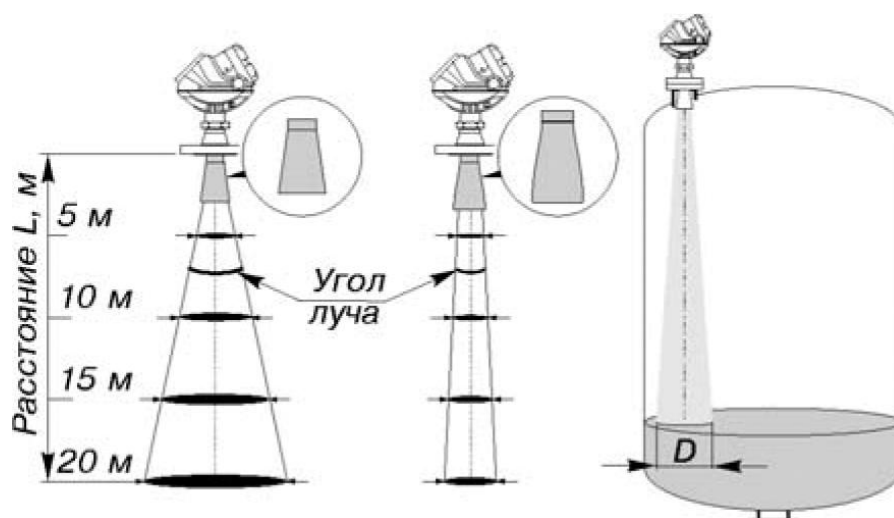


Рисунок 4.38 – Диаметр измерительного пятна радарного уровнемера

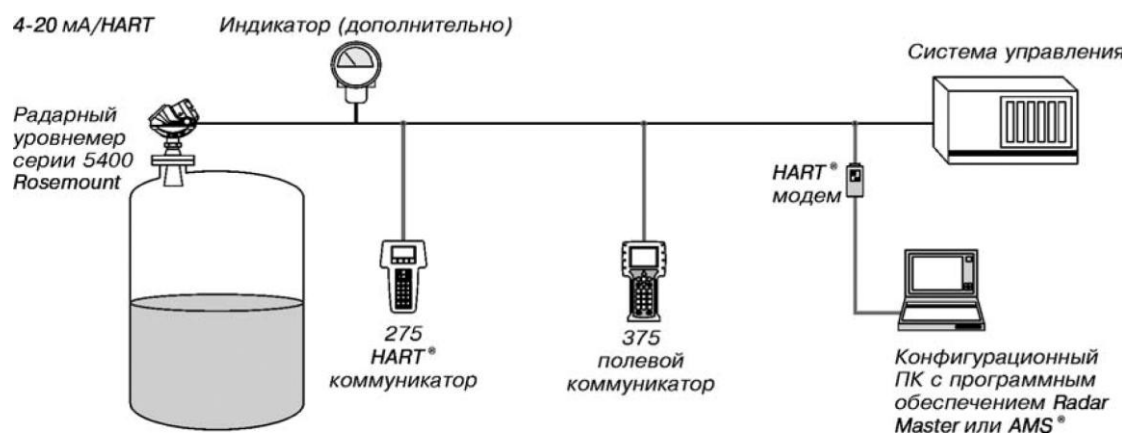


Рисунок 4.39 – Интегрирование радарного уровнемера в систему автоматизации

Измерение уровня воды в барабанном котле. Нормальная эксплуатация барабанных котлов может осуществляться только при условии строгого поддержания уровня воды в барабане в определенных допускаемых пределах. Максимально допустимые отклонения составляют ± 100 мм среднего значения, установленного заводом-изготовителем. Снижение уровня ниже места присоединения опускных труб циркуляционного контура - “упуск воды” - может привести к охлаждению водой подъемных труб, нарушению их прочности в местах стыковки с корпусом барабана, а в наиболее тяжелом случае - пережогу. Чрезмерное повышение уровня - “перепитка” - может привести к ухудшению действия внутрибарабанных сепарационных устройств, интенсивному заносу солями пароперегревателя, а также к забросу капель воды в турбину, что может явиться причиной тяжелых механических повреждений ротора и лопаток. Поэтому контроль за уровнем воды в барабане, особенно современных мощных парогенераторов, имеющих весьма ограниченный запас воды, является важной и ответственной задачей при их эксплуатации.

Контроль уровня воды в барабане котлоагрегатов малой производительности с низким давлением рабочей среды осуществляется путем непосредственного наблюдения за уровнем по водомерному устройству (простейшая конструкция гидростатических уровнемеров), которое поставляется вместе с котлом. Однако необходимо иметь в виду, что между уровнем котловой воды в барабане и показанием водомерного устройства имеются большие расхождения. Абсолютная погрешность колонки зависит от давления и уровня в барабане и имеет отрицательное значение, т.е. показания занижены по сравнению с действительным уровнем. Это объясняется интенсивным охлаждением колонки, вследствие которого плотность воды в ней становится выше, чем в барабане и, следовательно, уровень в колонке покажет более низкое значение. При повышении давления в котлоагрегате погрешность водомерного устройства возрастает. Поэтому мощные барабанные котлоагрегаты кроме указательных колонок дополнительно оснащаются уровнемерами, установленными в местах управления. Наиболее широкое применение получили гидростатические уровнемеры, основанные на измерении разности давлений двух водяных столбов ΔP .

Гидростатическое давление жидкости измеряют при помощи дифманометров, расположенных ниже резервуара, в котором измеряют уровень. В этом случае возникает влияние столба и плотности жидкости в импульсных линиях на результаты измерения. Для исключения этого влияния применяют уравнительные сосуды. Они предназначены для поддержания уровня жидкости в уравнительном сосуде постоянным относительно резервуара, в котором проводится измерение уровня.

В зависимости от мощности котлоагрегатов и требований к точности измерения уровня применяют однокамерные, двухкамерные, комбинированные двухкамерные уравнительные сосуды, уровнемеры с коррекцией по разности плотностей воды и пара т.п.

На рисунке 4.40 показана схема измерения уровня в барабане котла дифманометром с использованием двухкамерного уравнительного сосуда. В широкой части сосуда 1, присоединенного к паровому пространству барабана, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. В трубе 2 присоединенной к водяному пространству барабана, уровень воды меняется при изменении уровня воды в барабане. Разность давлений ΔP , создаваемая двухкамерным уравнительным сосудом, измеряется дифманометром 3 и может быть определена выражением:

$$\Delta P = (H - h) (p' - p'') g, \quad (4.26)$$

где H и h - высота столба воды в сосудах и трубе соответственно, м.

p' и p'' - плотность воды и пара в состоянии насыщения при давлении P , кг/м³;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

Из приведенного выражения следует, что при верхнем уровне воды в барабане $h=H$ и тогда при любом давлении пара в барабане $\Delta P_b=0$. При нижнем уровне воды в барабане $h=0$ и тогда

$$\Delta P_h = H(p' - p'')g. \quad (4.27)$$

При верхнем уровне воды в барабане ($H-h$) значение ΔP_b соответствует на шкале вторичного прибора дифманометра нижнему пределу измерения ($+N$). Значение ΔP_h при нижнем уровне воды в барабане ($h=0$) соответствует на шкале прибора верхнему пределу измерения ($-N$). Разность давлений ΔP_x , соответствующая отметкам шкалы вторичного прибора дифманометра, определяется выражением:

$$\Delta P_x = 0,5(\Delta P_h - \Delta p_h) \frac{\pm N_x}{|N|} \quad (4.28)$$

Значение N_x в миллиметрах берется со знаком плюс или минус. Измеряемый уровень воды в барабане выше нормального или среднего имеет знак плюс, а ниже - знак минус.

Все системы измерения уровня жидкостей гидростатическим методом требуют тщательного анализа измерительной системы, соединительных линий, их температурного режима, особенностей работы измерительных преобразователей системы.

На мощных парогенераторах ТЭС кроме уровнемеров для измерения уровня воды в барабане дополнительно устанавливают дифманометры со вторичными показывающими приборами, снабженными контактным устройством. Такие уровнемеры позволяют осуществлять технологическую защиту при перепитке парогенератора водой и при пуске уровня в его барабане.

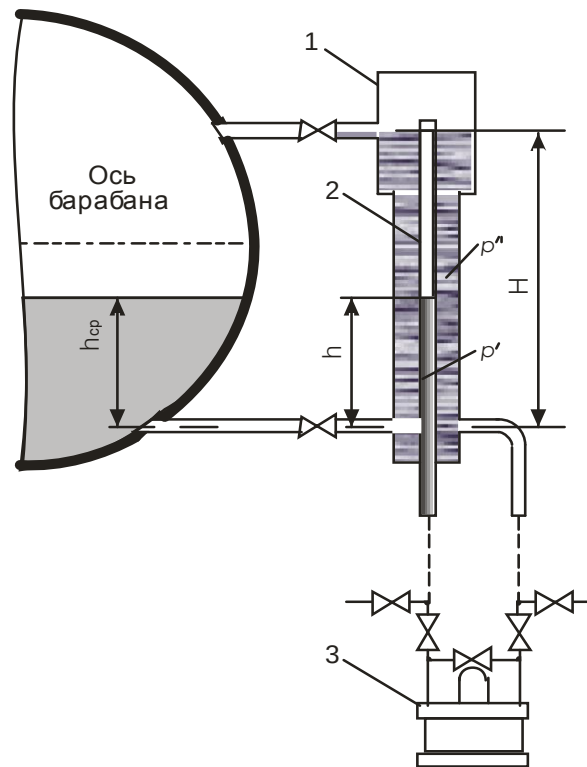


Рисунок 4.40 – Схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием двухкамерного уравнительного сосуда

Современные конструкции высокоточных интеллектуальных датчиков гидростатического давления (уровня). Высокоточные интеллектуальные датчики гидростатического давления (уровня) для измерения уровня жидкости обладают улучшенными значениями основной приведенной погрешности, малыми погрешностями от влияния дополнительной температуры и улучшенными значениями стабильности измерения во времени. Предназначены для измерения уровня в закрытых и открытых резервуарах, для производственных процессов в различных отраслях промышленности.

Во время работы датчика разделительные мембраны находятся со стороны высокого и низкого давления датчика, передают рабочее давление процесса заполняющей масляной жидкости. Эта жидкость, в свою очередь, передает давление сенсорной мембране в центре s-ячейки сенсора (рисунок 4.41). Сенсорная мембрана действует как растянутая пружина, отклоняясь в ответ на перепад давлений (в датчиках избыточного давления атмосферное давление прикладывается аналогичным образом со стороны низкого давления).

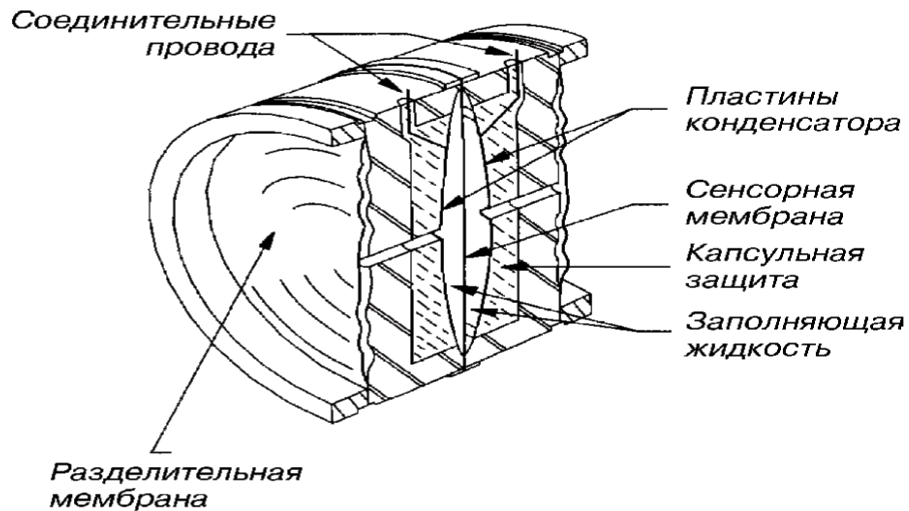


Рисунок 4.41 – Принцип работы гидростатического датчика

В датчиках абсолютного давления со стороны низкого давления поддерживается опорное давление. Смещение сенсорной мембраны (максимальное отклонение составляет 0,1 мм) пропорционально давлению. Пластины конденсатора на обеих поверхностях определяют положение сенсорной мембраны. Разностная емкость между сенсорной мембраной и пластинами конденсаторов преобразуется электронным образом в соответствующий выходной ток, напряжение или цифровой сигнал.

Получают применение также интеллектуальные датчики гидростатического давления с принципом действия, основанном на использовании пьезорезистивного эффекта в гетероэпитаксиальной пленке кремния, выращенной на поверхности монокристаллической пластины из искусственного сапфира. Чувствительный элемент с монокристаллической структурой кремния на сапфире является основой всех сенсорных блоков датчиков семейства "Метран".

При деформации чувствительного элемента под воздействием входной измеряемой величины (например, давления или разности давлений) изменяется электрическое сопротивление кремниевых пьезорезисторов мостовой схемы на поверхности этого чувствительного элемента.

Электронное устройство датчика преобразует электрический сигнал от тензопреобразователя в стандартный аналоговый сигнал постоянного тока и/или в цифровой сигнал.

В памяти сенсорного блока (АЦП) хранятся в цифровом формате результаты калибровки сенсора во всем рабочем диапазоне давлений и температур. Эти данные используются микропроцессором для расчета коэффициентов коррекции выходного сигнала при работе датчика.

Цифровой сигнал с платы АЦП сенсорного блока вместе с коэффициентами коррекции поступает на вход электронного преобразователя, микроконтроллер которого производит коррекцию и линеаризацию характеристики сенсорного блока, вычисляет скорректированное значение выходного сигнала датчика.

Раздел V. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ГАЗОВ

Тема 5.1. Отбор пробы газа. Термомагнитные газоанализаторы.

Термокондуктометрические газоанализаторы.

Оптико-акустические газоанализаторы

Газоанализатор - средство измерения, предназначенное для контроля концентрации компонентов в газовых смесях, принцип действия которого основан на различных физико-химических свойствах газов.

Газоанализатор состоит из устройства пробоподготовки, первичного и измерительного преобразователей.

Устройство пробоподготовки предназначено для отбора пробы анализируемой газовой смеси от технологического объекта, очистки пробы от агрессивных и механических примесей, приведения ее параметров (температуры, давления и т.п.) к значениям, нормированным для параметров пробы на входе в сенсор газоанализатора (некоторые современные газоанализаторы не нуждаются полностью или частично в пробоподготовке).

Пробоподготовка включает :

- отбор пробы газа;
- очистку от механических и химических примесей;
- охлаждение или нагрев;
- стабилизацию расхода, давления.

Отбор пробы газа осуществляется по схеме с принудительной циркуляцией, с естественной циркуляцией и со сбросом анализируемой пробы во внешнюю среду.

Очистка газовой смеси от механических примесей производится в основном с помощью механических фильтров (керамических, тканевых и т.д.) Для химической очистки газовых смесей применяют фильтры с сухими и жидкими поглотителями.

Для охлаждения пробы используется в основном холодильник (труба в трубе).

Для нагрева пробы используются специальные термостаты, содержащие нагревательные элементы (электрические).

Для понижения давления газа применяют редуцирующие устройства. Для поддержания давления газа постоянным применяют маностаты гидравлические, газовые и т.д.

Термомагнитные газоанализаторы. Магнитные свойства газов характеризуются объемной магнитной восприимчивостью χ , представляющей собой коэффициент пропорциональности между намагничиваемостью I единицы объема газа и напряженностью H магнитного поля в этом объеме:

$$I = \chi H. \quad (5.1)$$

Объемная магнитная восприимчивость, отнесенная к плотности газа, называется удельной магнитной восприимчивостью и обозначается

$$\lambda = \chi/\rho. \quad (5.2)$$

По своим магнитным свойствам газы делятся на парамагнитные ($\chi > 0$) и диамагнитные ($\chi < 0$).

Парамагнитные газы втягиваются в магнитное поле, а диамагнитные выталкиваются из него.

Кислород обладает парамагнитными свойствами. С повышением температуры магнитные свойства кислорода уменьшаются.

Магнитная восприимчивость смеси газов определяется как сумма произведений магнитной восприимчивости отдельных компонентов на их относительную объемную концентрацию:

$$\chi = \sum_{m=1}^n \chi_m q_m, \quad (5.3)$$

где q_m - концентрация отдельного компонента; n - число компонентов.

Так как кислород обладает наиболее высокими магнитными свойствами, магнитная восприимчивость кислородосодержащей смеси в основном определяется процентным содержанием в ней кислорода.

Магнитная восприимчивость кислорода равна

$$\chi_{O_2} = \frac{K P_{O_2} M_{O_2}}{R T^2}, \quad (5.4)$$

где K – постоянная Кюри, P_{O_2} – давление кислорода, M_{O_2} – молекулярный вес кислорода, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Очень трудно непосредственно измерить магнитную восприимчивость газовой смеси ввиду ее малого абсолютного значения, поэтому измерения производятся косвенными методами, которые основаны на различных физических явлениях. В построении промышленных автоматических анализаторов в основном используется термомагнитный метод измерения магнитной восприимчивости.

Принцип действия термомагнитных газоанализаторов основан на явлении возникновения потока парамагнитного газа, окружающего нагретое тело, внесенное в неоднородное магнитное поле. Существует ряд конструкций термомагнитных газоанализаторов. На рисунке 5.1 приведена принципиальная схема газоанализатора, выполненного в виде кольцевой камеры с поперечной перемычкой из стеклянной трубки. На поперечной трубке расположены нагревательные обмотки (спирали) R_1 и R_2 из тонкой платиновой проволоки.

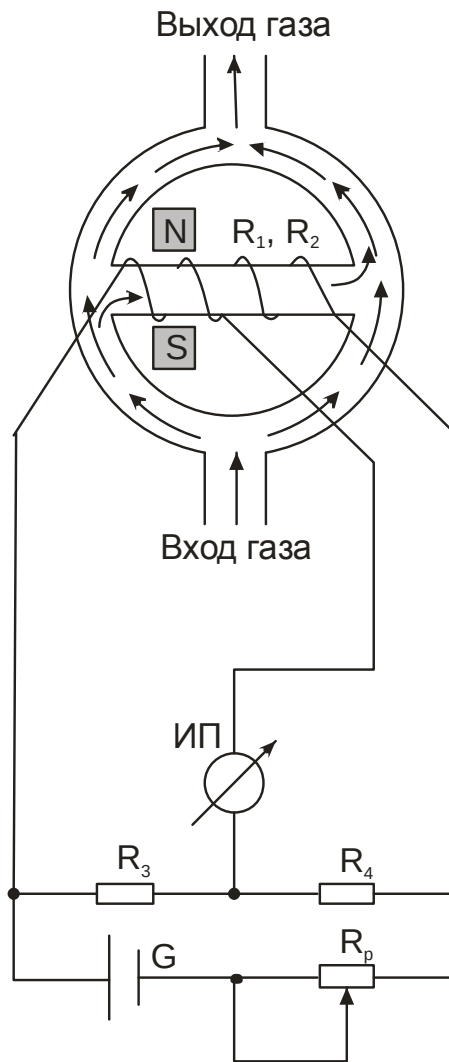


Рисунок 5.1 – Термомагнитный газоанализатор с кольцевой камерой

Обе эти обмотки включены в схему моста постоянного тока и нагреваются от источника G до температуры $200-250^{\circ}\text{C}$. Одна из обмоток расположена между полюсами постоянного магнита.

При отсутствии кислорода в анализируемой газовой смеси давление на обоих концах измерительной трубки одинаково и потока газа через нее нет. Температура, а следовательно, и сопротивление секций спирали одинаковы. На выходе мостовой схемы напряжение отсутствует.

При появлении в анализируемой смеси кислорода смесь становится парамагнитной и под действием магнитного поля втягивается в поперечную трубку. В трубке порция газа нагревается, частично теряет свои парамагнитные свойства и выталкивается из магнитного поля более холодным парамагнитным газом. Здесь выталкивающая сила, действующая на элементарный объем dV нагретого до температуры T_2 газа равна

$$dF = C_{O_2} \frac{K P_{O_2} M_{O_2}}{R} \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) H \frac{\partial H}{\partial X} dV, \quad (5.5)$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода в газовой смеси;

T_1 – абсолютная температура холодного газа;

H – напряженность магнитного поля;

X – координата.

В результате этого в трубке возникает непрерывный поток газа, направленный в сторону падения напряженности магнитного поля. Скорость потока зависит от процентного содержания кислорода в смеси. Этот поток носит название термомагнитной конвекции и вызывает изменение температуры секций спирали, что приводит к разбалансу мостовой схемы. Разбаланс, измеряемый прибором ИП, является мерой концентрации кислорода в анализируемой смеси.

Недостатки данной схемы измерения существенные: влияние внешних факторов на погрешность измерения.

На рисунке 5.2 приведена компенсационная схема измерения кислорода, имеющая меньшую дополнительную погрешность от внешних факторов. Здесь имеются два моста: I – измерительный и II – сравнительный. Платиновые термосопротивления R_1 и R_2 омываются газом, причем R_2 расположено в магнитном поле. В сравнительном мосте платиновые термосопротивления R'_1 и R'_2 омываются воздухом, где возле R'_2 находится имитатор магнита (латунный брусок), позволяющий обеспечить постоянную температурную симметрию мостов.

Термокондуктометрические газоанализаторы. Термокондуктометрический метод анализа газов основан на использовании зависимости теплопроводности анализируемой газовой смеси от содержания в ней анализируемого компонента, теплопроводность которого должна значительно превышать теплопроводность любого другого компонента смеси:

$$\lambda_{см} = C_1 \lambda_1 + (1 - C_1) \lambda_{н.к.}, \quad (5.6)$$

где $\lambda_{см}$ – теплопроводность смеси;

C_1 – концентрация определяемого компонента;

$\lambda_{н.к.}$ – теплопроводность смеси неизмеряемых компонентов;

λ_1 – теплопроводность определяемого компонента.

Теплопроводность газа практически не зависит от его давления, но зависит от температуры. Эта зависимость характеризуется уравнением:

$$\lambda = \lambda_0 (T/T_0)^k, \quad (5.7)$$

где T – температура газа, К;

$T_0 = 273$ К;

λ_0 – теплопроводность газа при T_0 ;

k – температурный коэффициент теплопроводности.

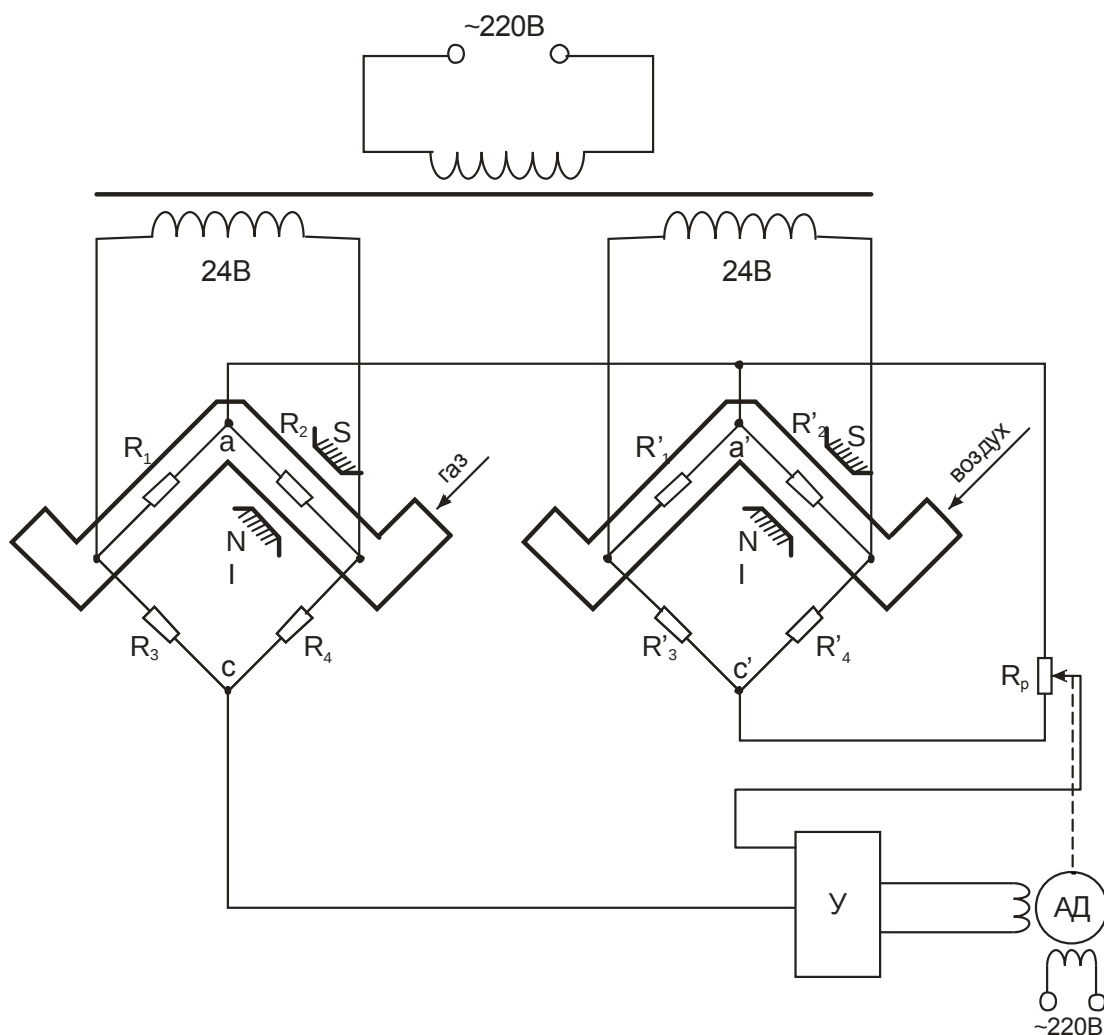


Рисунок 5.2 – Принципиальная компенсационная схема термомагнитного газоанализатора

В качестве чувствительного элемента в термокондуктометрических газоанализаторах используется платиновая проволока, помещаемая в исследуемую газовую смесь и нагреваемая электрическим током.

Изменение концентрации измеряемого компонента в смеси меняет теплопроводность смеси, что приводит к изменению теплоотдачи от проволоки и, следовательно к изменению ее температуры и сопротивления.

Таким образом, по сопротивлению платиновой проволоки можно судить о концентрации анализируемой газовой смеси.

Для многокомпонентных газовых смесей зависимость суммарной теплопроводности от концентрации компонентов определяется неоднозначно, поэтому использовать метод измерения теплопроводности для анализа трех- и многокомпонентных газовых смесей можно лишь при условии постоянства соотношения концентраций компонентов в смеси.

В термокондуктометрических приборах применяется способ относительного измерения путем сравнения теплопроводности анализируемой газовой смеси с теплопроводностью эталонной смеси постоянного состава.

Для измерения относительной теплопроводности применяется мостовая схема (рисунок 5.3). Плечами моста являются проволочные резисторы, выполненные из проводника с большим температурным сопротивлением. Резисторы нагреваются током от источника напряжения U . Ток в питающей диагонали моста устанавливают по миллиамперметру с помощью регулируемого резистора R_p .

Резисторы R_1 и R_3 помещены в специальные измерительные камеры, через которые пропускают анализируемую смесь; резисторы (R_2 и R_4) находятся в камерах, заполненных сравнительным газом (воздух). Резистором R_0 схему балансируют таким образом, что при концентрации анализируемого компонента в смеси, соответствующей началу шкалы прибора, в измерительной диагонали напряжение отсутствует.

При изменении концентрации определяемого компонента в смеси изменяется ее теплопроводность, вследствие чего изменяется теплоотдача, а следовательно, и температура резисторов R_1 и R_3 .

Изменение температуры ведет к изменению их сопротивлений.

Так как резисторы R_1 и R_3 включены в противоположные диагонали моста, то изменение их сопротивлений нарушает баланс моста. Разбаланс моста измеряется вторичным прибором, шкала которого градуирована непосредственно в процентах анализируемого компонента.

Показания прибора, основанного на схеме неуравновешенного моста, зависят от температуры окружающей среды и от изменения питающего напряжения. Для устранения колебаний температуры окружающей среды блок датчика термостатирован. Ток питания необходимо периодически контролировать и при отклонении от установленного значения - регулировать.

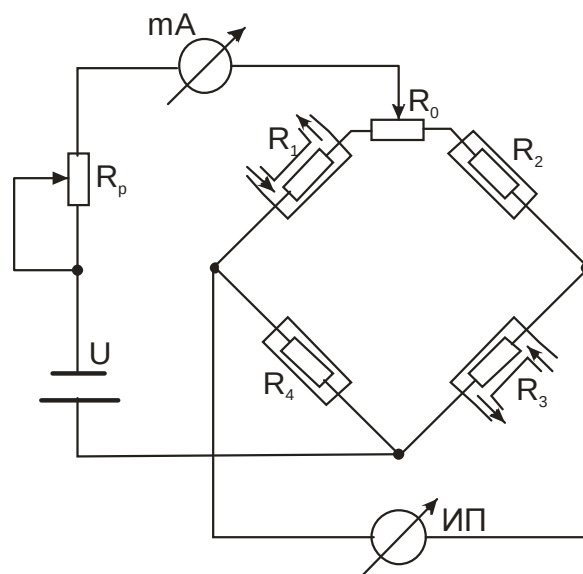


Рисунок 5.3 – Термокондуктометрический газоанализатор

Оптико-акустические газоанализаторы. Действие оптико-акустических газоанализаторов основано на изменении поглощения лучистой энергии. Этот метод используется для определения концентрации газов, имеющих полосы поглощения в инфракрасной области спектра.

Механизм поглощения лучистой энергии газами обусловлен частотами собственных колебаний атомов или ионов и отдельных структурных групп в молекуле, а также вращением молекул. Способностью поглощать излучение в инфракрасной области спектра обладают газы, молекулы которых состоят из двух или большего числа атомов или ионов, за исключением кислорода O_2 , азота N_2 , водорода H_2 . Одноатомные газы не поглощают лучей инфракрасной радиации.

Степень поглощения излучения каждым из поглощающих газов изменяется при изменении длины волны, проходящей через газ радиации. Каждый газ поглощает радиацию в определенной, свойственной ему области спектра: окись углерода - в области 4,7 мкм; двуокись углерода - 2,7 и 4,3 мкм; метан - 3,3 и 7,64 мкм.

Источником создается постоянное излучение (рисунок 5.4), которое с помощью обтюратора (вращающийся диск с отверстиями) и светофильтра преобразуется в пульсирующее монохроматическое излучение. Анализируемый газ, находящийся в камере, поглощает излучение, при этом в камере возникают пульсации температуры и давления. Пульсации давления в камере воспринимаются микрофонным чувствительным элементом, представляющим собой конденсатор, образованный подвижной мембраной и неподвижной пластиной. Под действием давления мембрана перемещается, вызывая изменение емкости конденсатора C , вследствие изменения зазора δ .

Тема 5.2. Термохимические газоанализаторы. Электрохимические газоанализаторы. Оптико-электрические газоанализаторы

Электрохимический газоанализатор на твердом электролите. Принцип работы газоанализатора на твердом электролите - потенциометрический. Его работа основана на использовании зависимости ЭДС концентрационной (по кислороду) электрохимической цепи с твердым электролитом и газовыми электродами от концентрации кислорода в газовых смесях, подаваемых на электроды.

Схема гальванического элемента состоит (рисунок 5.5) из твердого электролита, находящегося между металлическими электродами I и II, которые омываются газовыми смесями с различными парциальными давлениями кислорода ($p'' > p'$). Если электроды пористые и могут достаточно легко пропускать кислород, то вследствие различия между p'' и p' на обеих границах твердого электролита с электродами установится различный химический потенциал U_1 и U_2 кислорода, под действием которого ионы кислорода будут диффундировать с электрода с большим p'' на электрод с меньшим p' . При этом на первом электроде электроны забираются, на втором освобождаются. В результате между границами

электрод - твердый электролит возникает электрическое поле, причем электрод, омываемый газом с большим парциальным давлением кислорода, будет заряжен положительно, а второй - отрицательно. С помощью металлических электродов и соединенных с ними металлических токоотводов разность потенциалов ($U_2 - U_1$) передается во внешнюю цепь. При подаче на один из электродов газа с известным парциальным давлением кислорода (эталонного газа) значение ЭДС датчика при заданной температуре однозначно определяется парциальным давлением кислорода в анализируемом газе, подаваемом на другой электрод, подчиняясь термодинамическому соотношению Нерста:

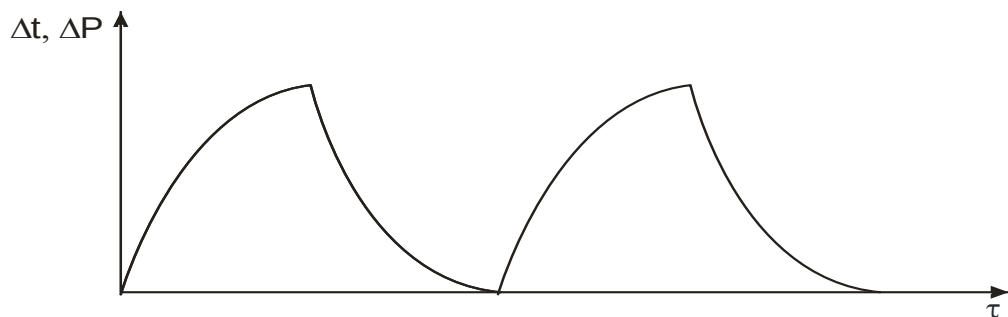
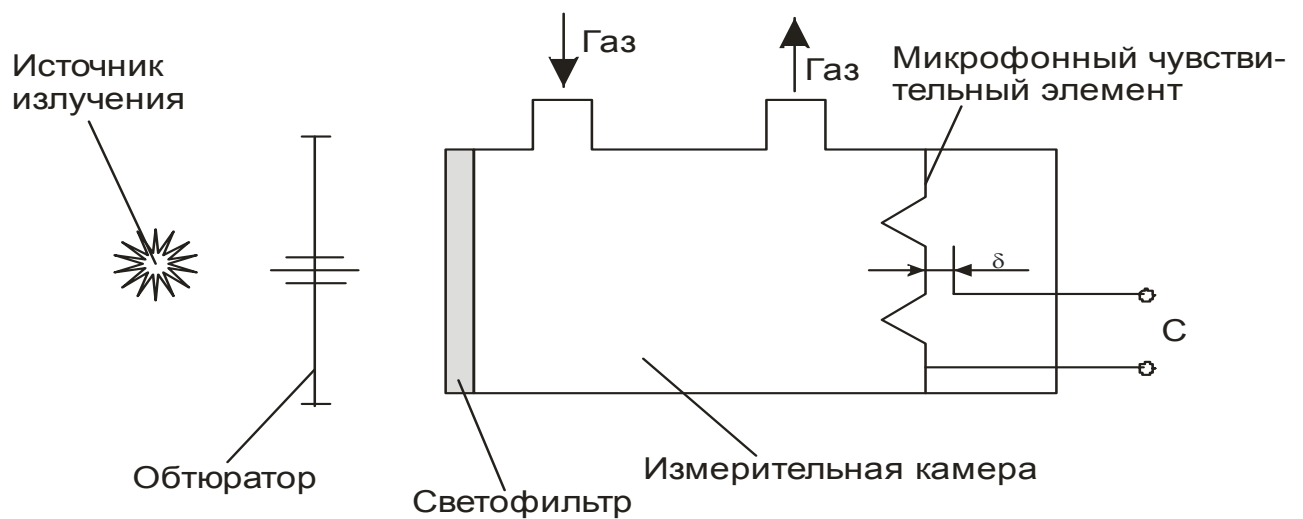
$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_2 \text{ эт}}}{P_{O_2 \text{ ан}}}, \quad (5.8)$$

где R - газовая постоянная;

T - температура электродов и электролита, К;

F - константа Фарадея;

$P_{O_2 \text{ эт}}$ и $P_{O_2 \text{ ан}}$ - парциальные давления кислорода соответственно в эталонном и анализируемом газах.



Пульсации температуры и давления в измерительной камере

Рисунок 5.4 – Оптико-акустический газоанализатор

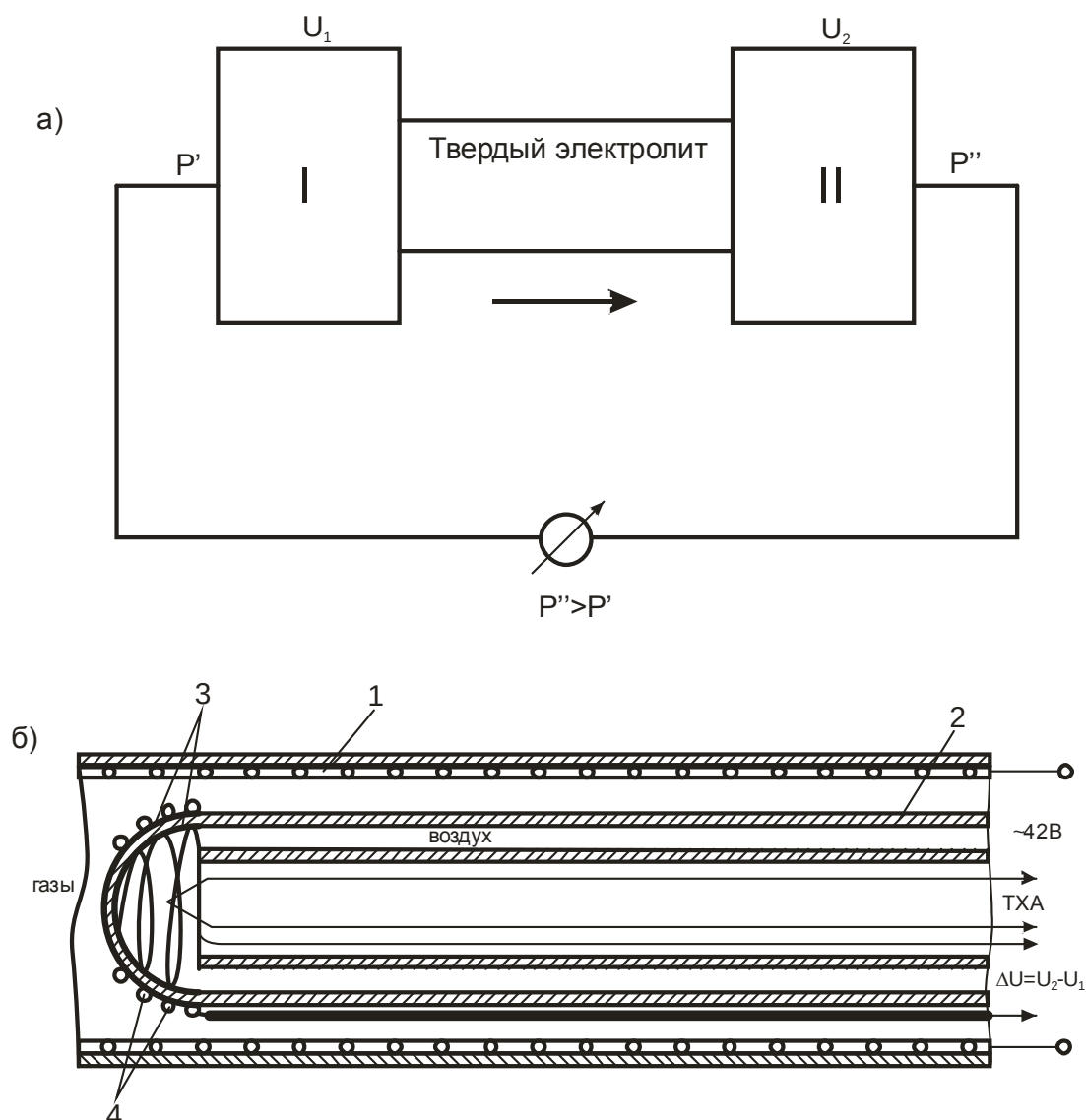


Рисунок 5.5 – Схема гальванического элемента (а) и конструкция сенсора (б) электрохимического газоанализатора на твердом электролите:

1 – нагревательный элемент; 2 – твердоэлектролитная пробирка (двуокись циркония Zr_2O_3 , стабилизированная окись итрия, Ø 10x1 мм); 3 – наружный и внутренний электроды (напыление Pt); 4 – наружный и внутренний токосъемники (проволока Pt).

При переходе к концентрациям кислорода, выраженным в объемных процентах, соотношение (5.8) принимает вид:

$$E = \frac{RT}{4F} \ln \frac{C_{O_{2\text{эт}}}}{C_{O_{2\text{ан}}}}, \quad (5.9)$$

где $C_{O_{2\text{эт}}}$ и $C_{O_{2\text{ан}}}$ - процентное содержание кислорода соответственно в эталонном и анализируемом газах.

Объемная концентрация C_i и парциальное давление P_i связаны соотношением: $\frac{P_i}{P} = C_i$.

Для случая, когда сравнительным газом является атмосферный воздух, уравнение (5.9) принимает вид

$$E = 0,0496T \lg \frac{20,86}{C_{O_2ан}}.$$

На рис. 5.5б приведена конструкция сенсора электрохимического газоанализатора. Наружную поверхность сенсора омывается дымовыми газами, а внутренняя – воздухом. В зоне сенсора за счет обогрева его электронагревателем поддерживается постоянная температура, например, 700°C (с уменьшением температуры проводимость твердого электролита падает, при $t_{из}=20^\circ\text{C}$ $R_{из}=\infty$). Для контроля за температурой сенсора внутри его помещена термopара ТХА, сигнал от которой поступает на регулятор. На выходе чувствительного элемента имеем сигнал равный

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 48,268 \lg \frac{20,9}{C_{O_2ан}}.$$

Данный метод измерения позволяет измерять малые концентрации O_2 в газах с высокой точностью, так как с уменьшением концентрации сигнал ΔU растет (при $O_2=1\%$ $\Delta U=63,73\text{мВ}$, при $O_2=5\%$ $\Delta U=30,0\text{мВ}$), но при концентрации $O_2 < 0,01\%$, из-за большого влияния кислородной проницаемости твердого электролита, измерения осуществляются с недопустимой погрешностью.

Термохимические газоанализаторы. Термохимический метод измерения концентрации газов основан на измерении полезного теплового эффекта химических реакций, протекающих в присутствии катализатора.

Наибольшее распространение получили схемы, в которых используется реакция окисления (горения). Существуют два типа схем построения термохимических газоанализаторов. К первому типу относятся схемы, в которых реакция, сопровождающаяся выделением тепла, протекает на катализаторе (обычно на платиновой нити), причем катализатор одновременно используется и как чувствительный элемент измерительной схемы. Такие схемы используют в приборах, работающих в качестве индикаторов или сигнализаторов горючих газов в воздухе производственных помещений.

Ко второму типу относятся схемы, в которых реакция протекает на насыпном катализаторе, а полезный тепловой эффект, сопровождающий реакцию, измеряется термочувствительными элементами. Схема представляет собой уравновешенный мост (рисунок 5.6) переменного тока, два плеча которого

образованы рабочим $R_{t \text{ раб}}$ и сравнительным $R_{t \text{ ср}}$ термометрами сопротивления. Два других плеча образованы резисторами R_1 и R_2 с постоянными сопротивлениями. Резистор R_0 служит для установки нуля.

Рабочий термопреобразователь сопротивления находится в катализаторе, сравнительный - в неактивной массе. При отсутствии в газовой смеси определяемого компонента термопреобразователь находится в зонах с одинаковой температурой и мостовая схема находится в равновесии. При наличии в газовой смеси анализируемого компонента на катализаторе протекает реакция с выделением тепла, в результате чего температура катализатора повышается. Изменение температуры вызывает изменение сопротивления рабочего термопреобразователя и соответственно вызывает появление сигнала разбаланса, который вызывает вращение реверсивного двигателя РД и связанного с ним подвижного контакта регулируемого резистора R_p . Перемещение подвижного контакта регулируемого резистора и связанной с ним стрелки вторичного прибора пропорционально содержанию компонента в смеси.

Оптоэлектронные газоанализаторы. Применяются при измерении концентрации CO , SO_2 , NO_x и т.д. в многокомпонентных газовых смесях. Принцип измерения основан на бесконтактном оптоэлектронном методе, основанном на поглощении молекулами газов световой энергии в определенном диапазоне длин волн, типичном для каждого газа. На рисунке 5.7 приведена принципиальная схема измерения концентрации CO оптоэлектронным методом.

В блоке передатчика расположен источник ИК-излучения, испускаемый свет проходит известное расстояние до приемника через газ (газоход). В блоке приема свет проходит через специальный ИК-фильтр и попадает на светочувствительный датчик, измеряющий поглощение света молекулами CO в определенном характерном диапазоне длин волн и сравнивает его с интенсивностью испускаемого света. С помощью этого соотношения рассчитывается концентрация CO в мг/м^3 или ppm (часть на миллион). На рис. 7.8 приведена принципиальная схема измерения оптоэлектронным методом концентрации NO_x и SO_2 .

Блок приемо-передатчика содержит дейтериевую линзу, излучающую пульсирующий свет, который проходит систему зеркал, затем через дымовые газы в измерительной щели зонда и попадает на рефлектор, который отражает луч в обратном направлении. При прохождении луча через дымовые газы в прямом и обратном направлении его интенсивность уменьшается из-за поглощения света отдельными газовыми компонентами. Возвратившийся световой луч разлагается на спектр и направляется на соответствующие чувствительные элементы светоприемника.

Основные преимущества оптоэлектронных газоанализаторов:

- не нужна система пробоотбора и пробоподготовки;
- малая динамическая погрешность;
- измеряется осредненная концентрация;
- отсутствие перекрестной чувствительности.

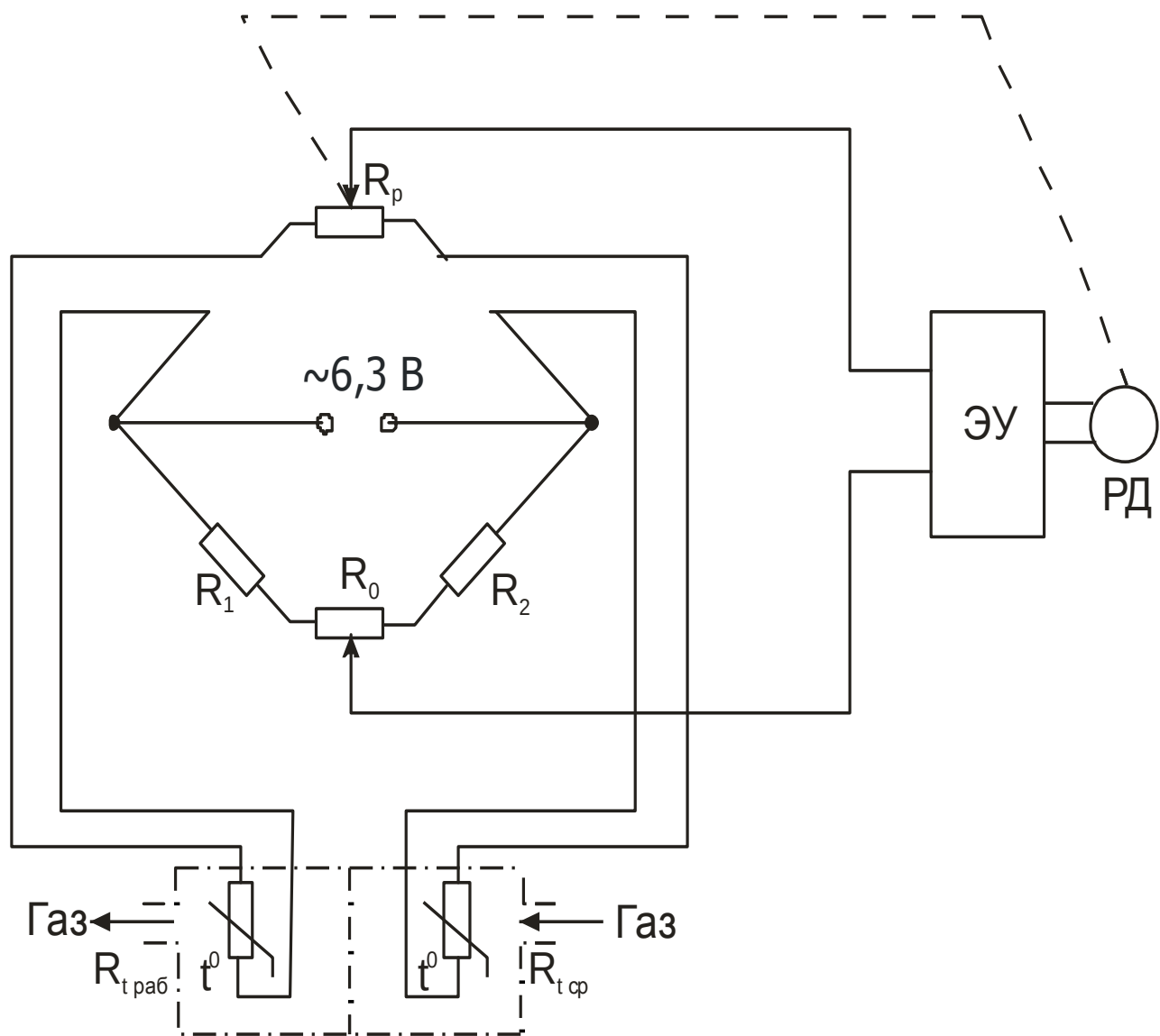


Рисунок 5.6 – Термохимический газоанализатор

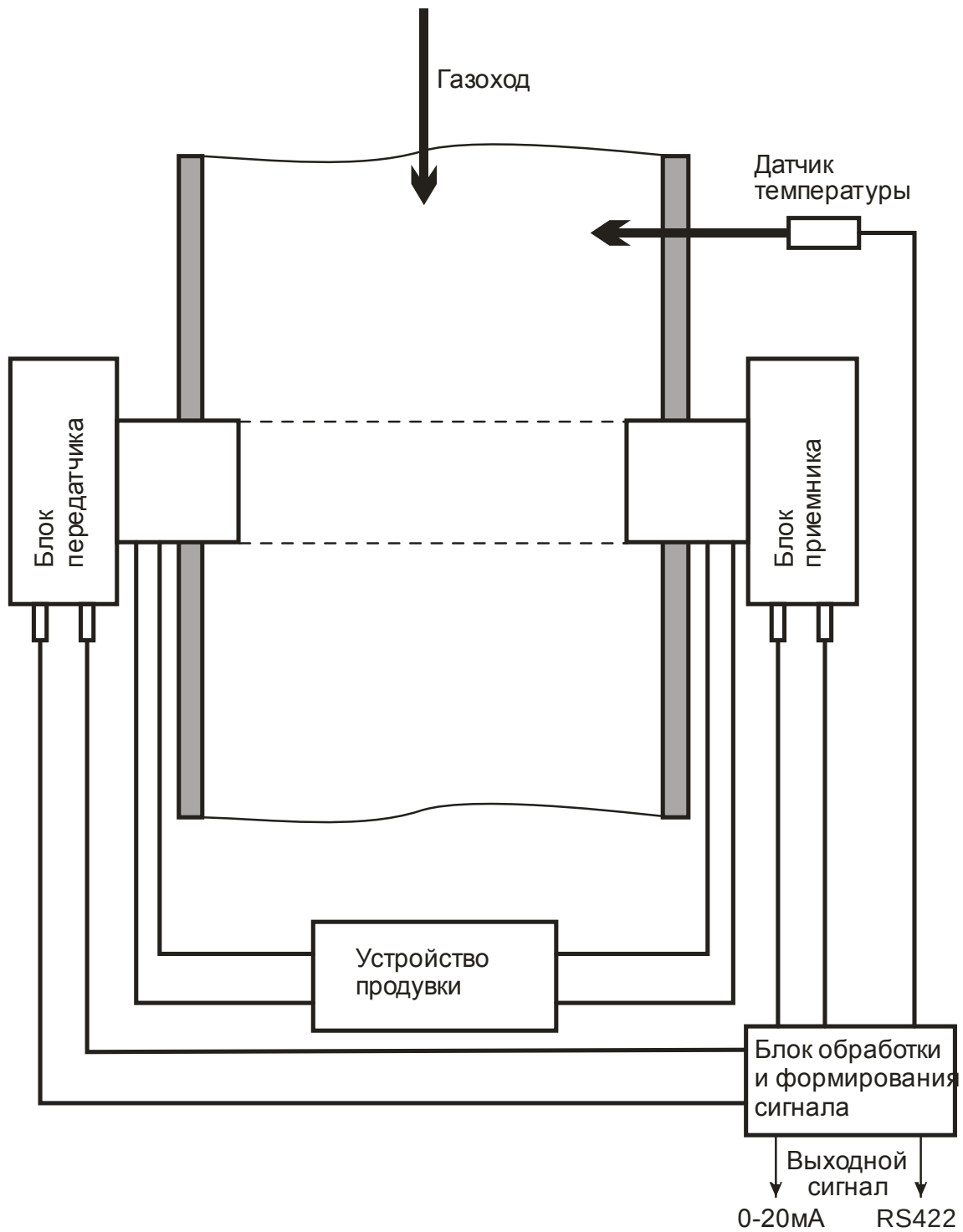


Рисунок 5.7 – Принципиальная схема оптоэлектронного газоанализатора для измерения концентрации CO

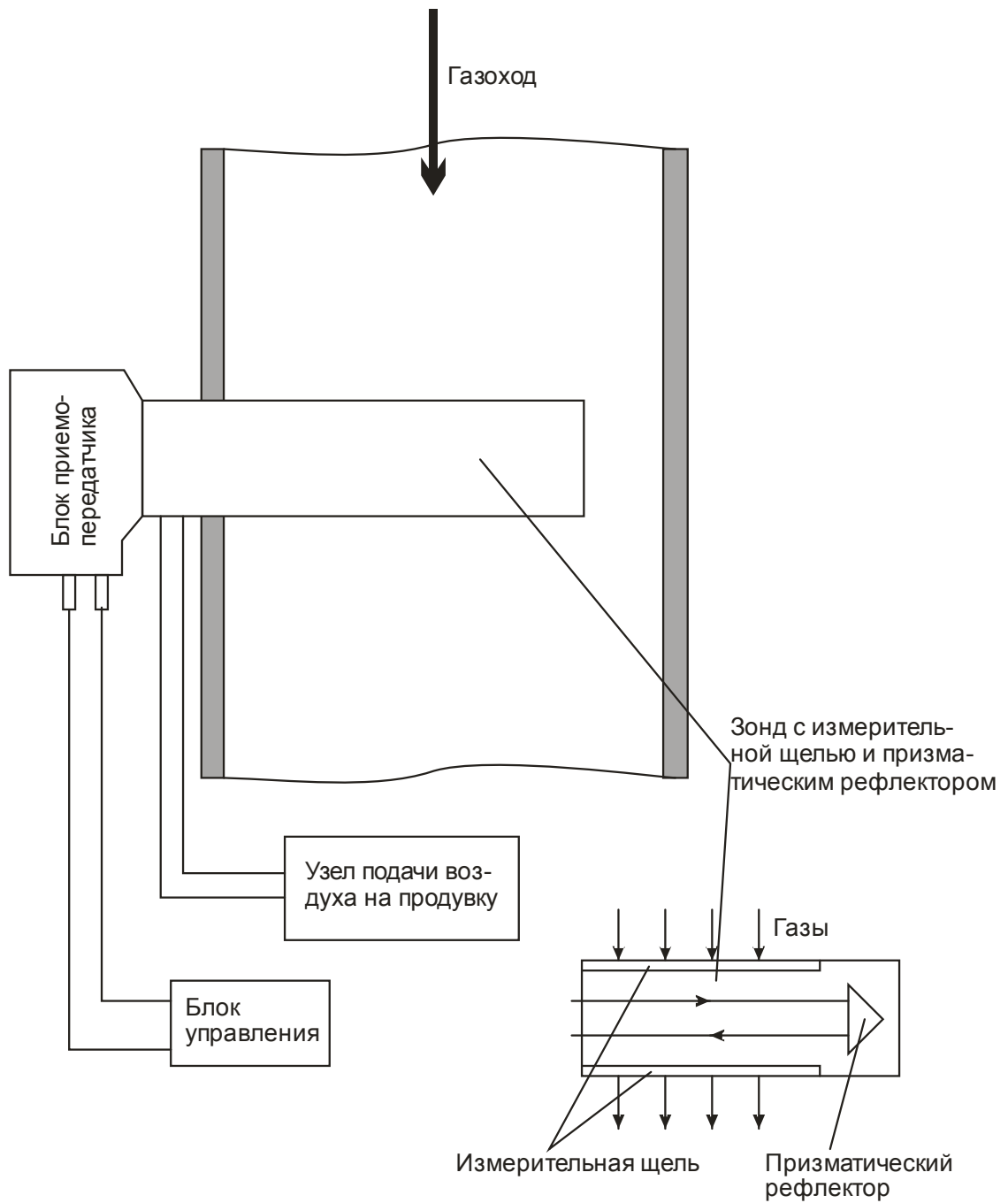


Рисунок 5.8 – Принципиальная схема оптоэлектронного газоанализатора для измерения концентрации NO_x и SO_2

Раздел VI. ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Тема 6.1. Передача информации средствами измерения

Основы теории передачи информации. Объем информации G любого отдельного измерения равен:

$$G = \log_2 N, \quad (6.1)$$

где N - число различных возможных значений результата измерения.

Вне зависимости от характера измерения величина G составляет при двух значениях измерения 1 *бит*, при четырех - 2 *бит*, при восьми - 3 *бит* и т.д.

Объем информации серийной передачи за время τ равен:

$$G_n = n_\tau \log_2 N, \quad (6.2)$$

где n_τ - число информации, передаваемых за время τ , равное $n_\tau = n\tau$;

n - количество информации, передаваемых за 1 сек.

Объем информации, переданной за 1 сек., является потоком информации и равен:

$$J = n \log_2 N \text{ бит/сек.} \quad (6.3)$$

Непрерывное измерение может быть представлено как серия последовательных дискретных измерений. При этом измерение отличается от истинного значения измеряемого параметра в пределах погрешности измерения на величину $A = 2K$, где K - погрешность измерения.

Показания средства измерения можно разбить на ряд фиктивных ступеней:

$$N_f = 1 + \frac{D}{A}, \quad (6.4)$$

где N_f - число фиктивных ступеней;

D - диапазон измерения.

За время τ_m указатель прибора останавливается на новой отметке шкалы в пределах точности прибора, а средство измерения передает поток информации, равный:

$$J_m = n \lg_2 N_f \text{ или}$$

$$J_m = \frac{1}{\tau_m} \log_2 \left(1 + \frac{D}{2K} \right). \quad (6.5)$$

Средство измерения считается сконструированным правильно, если существует взаимосогласованность между чувствительным элементом датчика, каналами связи и вторичным прибором.

Информационная емкость датчика должна быть меньше объема передаваемой информации или равной ему. Их отношение определяется коэффициентом использования η , равным отношению передаваемой информации к информационной емкости.

$$\eta = \frac{J}{J_m} = \frac{n \log_2 N}{\frac{1}{\tau_m} \log_2 \left(1 + \frac{D}{2K} \right)}. \quad (6.6)$$

При идеальном согласовании, когда $\eta=1$, имеем:

$$n \log_2 N = \frac{1}{\tau_m} \log_2 \left(1 + \frac{D}{2K} \right). \quad (6.7)$$

Величина n является числом подключений за сек и при $\eta=1$ равняется наибольшей частоте срабатывания измерительного прибора, равной $\frac{1}{\tau_m}$.

Пропускная способность средства измерения может быть найдена из уравнения:

$$J_n = \frac{\lg_2 \left(\frac{50}{K} \right)}{\tau}, \quad (6.8)$$

где K - погрешность измерения (класс точности прибора);

τ - постоянная времени прибора (для электронных мостов и потенциометров - время пробега каретки шкалы прибора).

Уравнение (6.8) показывает, что точные, но медленные измерения могут нести столько же информации, сколько дают менее точные, но более быстрые измерения.

Между чувствительностью, точностью, быстродействием и энергопотреблением приборов существует взаимосвязь вида:

$$\log x = \frac{1}{2} \lg \frac{\delta_i^2 E I \tau_i}{2 k T}, \quad (6.9)$$

где δ_i - точность при единичном измерении;

τ_i - время действия (быстродействие);

E - предел измерения по напряжению (чувствительность);

I - сила тока (потребление);

χ - коэффициент, показывающий относительную потерю точности в приборе (зависит от совершенства его конструкции);

T - температура при измерении, °K;

k - постоянная Больцмана;

Учитывая, что $IE=W$, т.е. мощности, потребляемой входной цепью прибора, уравнение (6.2) можно записать:

$$\delta_i^2 \tau_i W_\chi = 2kT, \quad (6.10)$$

где $W_\chi = \frac{W}{\chi}$ - полезная информационная мощность.

Учитывая, что произведение $\delta_i^2 \tau_i = \tau$ является “мертвым временем” измерительного устройства, уравнение (6.3) можно преобразовать:

$$\tau W_\chi = 2kT. \quad (6.11)$$

Уравнение (6.2) показывает, что улучшение одного из четырех параметров может быть осуществлено только за счет других параметров и что улучшение точности измерения δ_i осуществляется труднее всего, так как она входит в уравнение (6.9) как величина второго порядка. Усовершенствование приборов может быть достигнуто только за счет снижения потерь информации ΔG .

Системы дистанционной передачи информации. В общем случае система передачи информации включает в себя первичный, нормирующий и передающий измерительные преобразователи, вторичные приборы, устройства контроля, сигнализации, автоматического регулирования или информационные цифровые системы. Передача информации в системе осуществляется сигналами:

- пневматическими;
- токовыми;
- дифференциально-трансформаторными
- цифровыми.

Пневматическая система передачи. Основными элементами здесь является преобразователь типа «сопло-заслонка», преобразующий перемещение заслонки в изменение пневматического сигнала (рисунок 6.1). Сжатый воздух с постоянным давлением P_1 от источника питания через постоянный дроссель 1 поступает в проточную камеру 2, из которой выходит в атмосферу через сопло 3, управляемое заслонкой 4. Проточная камера 2 линией связи 5 соединена с прибором 6, регистрирующим выходной сигнал преобразователя. При перемещении заслонки в пределах 0,02-0,05мм под действием параметра x давление P_2 изменяется от 0 до 100 кПа. Характеристика $P_2 = f(x)$ является нелинейной. Для получения линейной зависимости применяют компенсационный метод преобразования сигнала перемещения или усилия в пропорциональный ему пневмосигнал.

Пневматические приборы обеспечивают передачу информации в диапазоне 20-100 кПа при питании 140 кПа. Длина канала связи – 300м.

Токовая система передачи. Токовая система передачи получила наибольшее распространение. В ней используются следующие пределы измерения унифицированного электрического сигнала: 0..5; 0..20 и 4..20 мА.

Токовая система передачи информации позволяет осуществлять передачу информации от одного датчика – преобразователя токового сигнала к нескольким вторичным устройствам (рисунок 6.2). При этом необходимо иметь в виду, что любой преобразователь тока может обеспечить передачу информации на некоторую ограниченную нагрузку. Как правило, она не должна быть больше 2,5 кОм при токе 5мА и 1,0 кОм при токе 20 мА. Длина каналов связи в токовой системе передачи, как правило, не превышает нескольких километров.

Дифференциально – трансформаторная система передачи. Основным элементом здесь является дифференциально – трансформаторный преобразователь, предназначенный для преобразования линейного перемещения сердечника (связанного с чувствительным элементом) в выходной электрический сигнал. Принцип действия дифференциально – трансформаторного преобразователя основан на зависимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой от положения сердечника. Преобразователь представляет собой трансформатор (рисунок 6.3), имеющий обмотку возбуждения 3 и две секции 1 и 2 вторичной обмотки, включенные встречно, дифференциально, где ЭДС E вторичной обмотки определяется как:

$$E = I_1 - I_2 = 2\pi f I_b (M_1 - M_2) = 2\pi f M, \quad (6.12)$$

где M – взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и вторичной обмоткой преобразователя;

I_1 – ЭДС, индуцируемая в секции 1;

I_2 – то же в секции 2;

I_b – ток возбуждения;

f – частота тока возбуждения.

На рисунке 6.4 представлена упрощенная схема дифференциально – трансформаторной системы передачи. Датчик D и вторичный прибор $ВП$ имеют аналогичные дифференциально – трансформаторные преобразователи, первичные обмотки которых включены последовательно и питаются переменным напряжением 24В от усилителя $У$. Вторичные обмотки катушек, состоящие из двух секций, включены встречно. Сердечник дифференциально – трансформаторного преобразователя датчика связан с чувствительным элементом прибора. Сердечник преобразователя, встроенного во вторичный прибор, связан с выходным валом реверсивного двигателя $РД$. При подаче переменного напряжения на первичные обмотки преобразователей во вторичных обмотках индуцируется ЭДС, значение и фаза которой зависят от положения сердечника в катушке. При рассогласовании положений сердечников появляется сигнал разбаланса, который после усиления приводит во вращение двигатель $РД$.

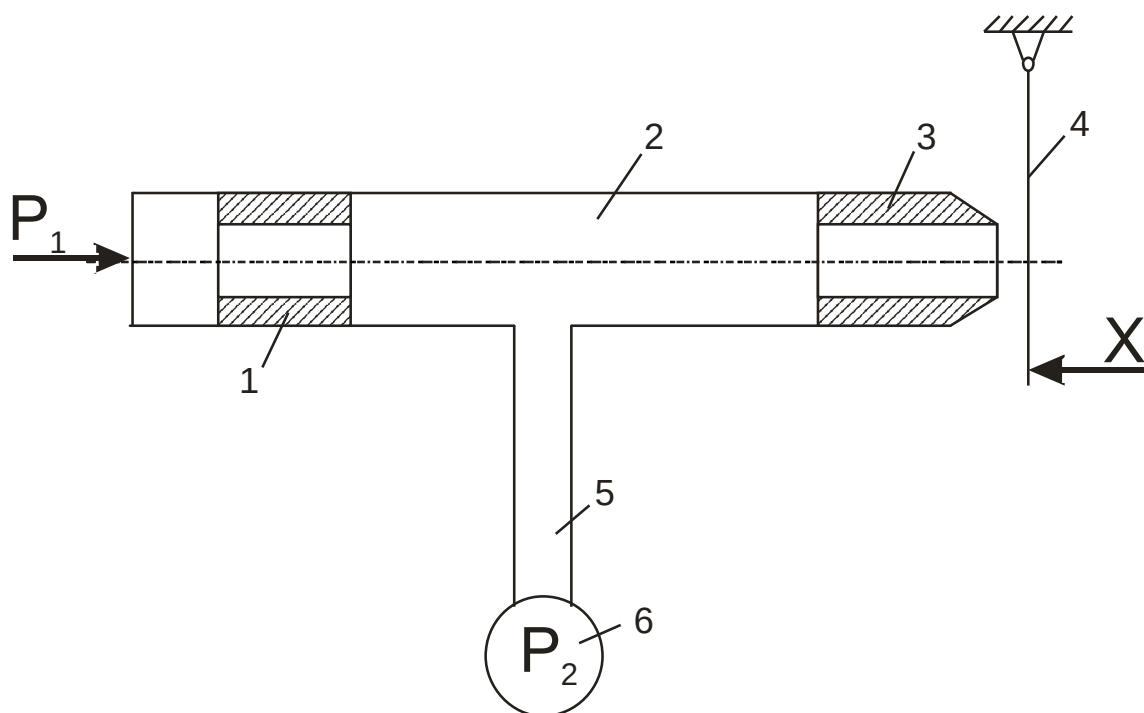


Рисунок 6.1 – Пневматическая система передачи пневмопреобразователь типа «сопло-заслонка»

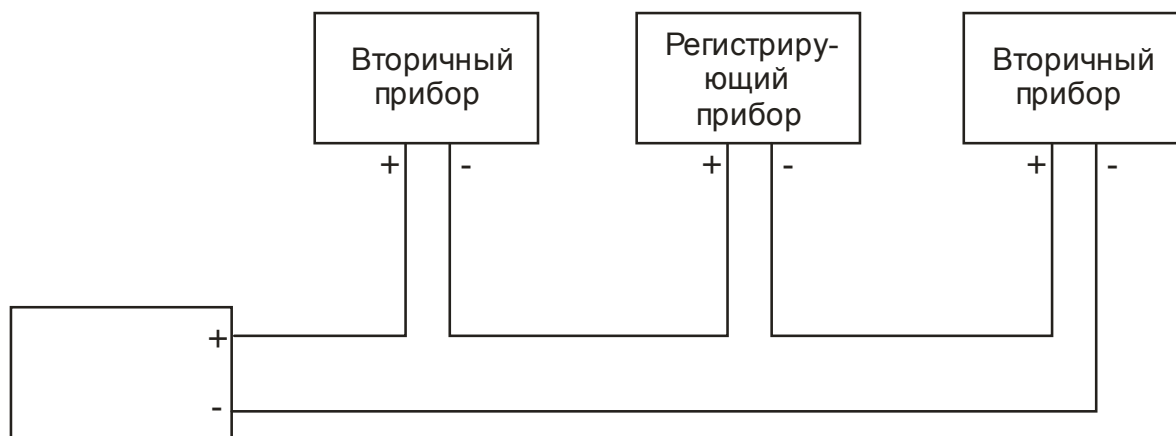


Рисунок 6.2 – Токовая система передачи информации

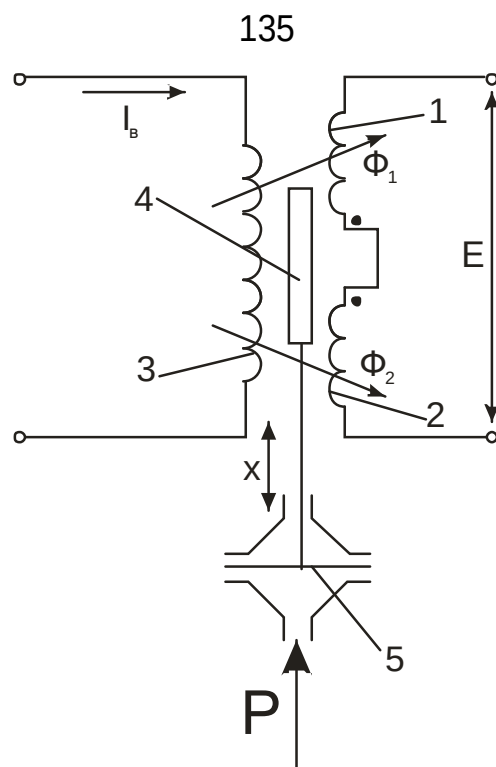


Рисунок 6.3 – Схема невзаимозаменяемого дифференциально-трансформаторного преобразователя

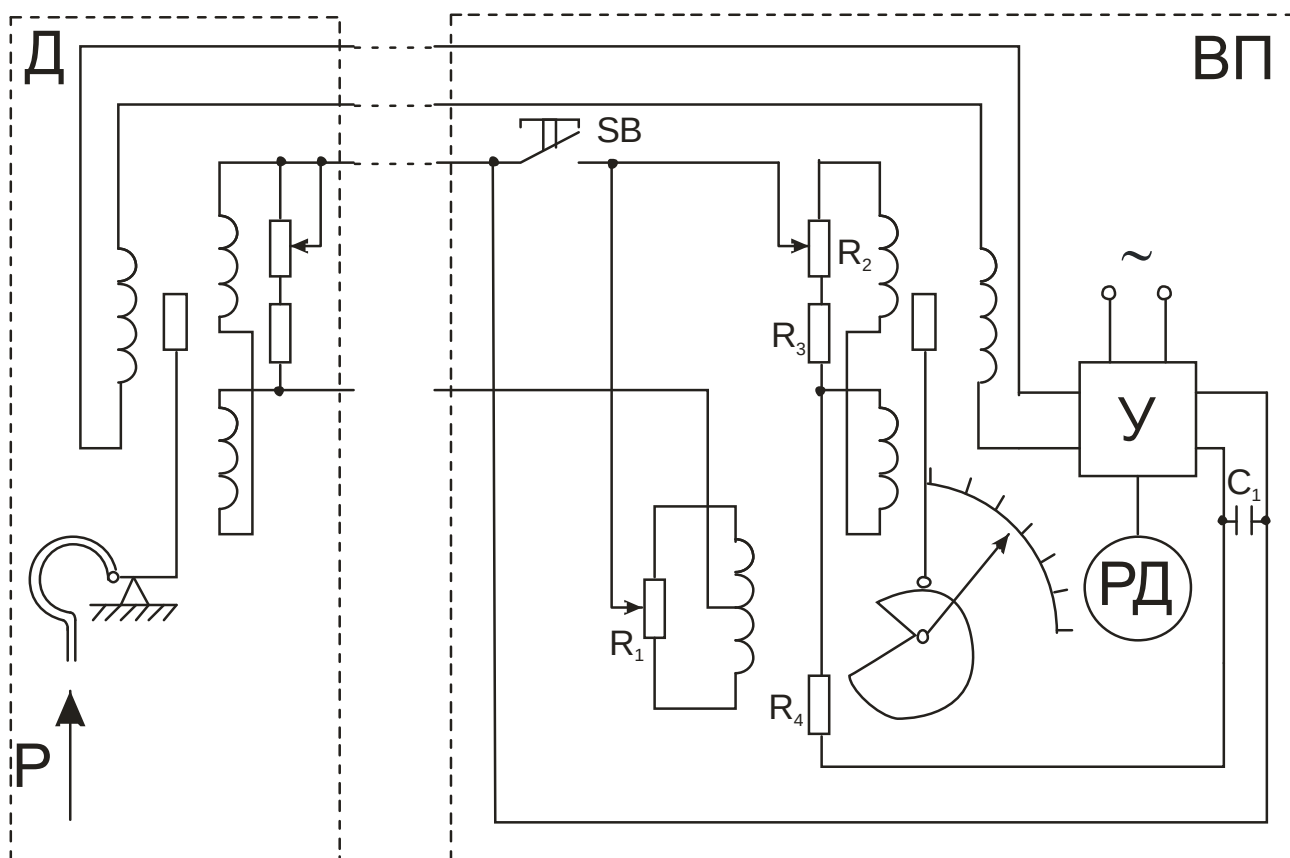


Рисунок 6.4 – Дифференциально-трансформаторная система передачи

При этом показания прибора и положение сердечника **ВП** изменяются до тех пор, пока сигналы рассогласования не станут равными нулю.

Выходной сигнал дифференциально - трансформаторном преобразователе изменяется в пределах от 0 до 10 мГн, либо в виде изменения напряжения переменного тока $-1..+1$; $0..2В$; $1..3В$.

Цифровые системы передачи данных. RS-протоколы передачи данных. RS (Recommended Standard) – в сокращениях типа RS-232, RS-485, RS-422 обозначает рекомендованный стандарт. Ключевое слово тут - "рекомендованный", означающее, что эти стандарты никогда никем не были приняты, они были просто "рекомендованы", что позволяет различным производителям оборудования вносить в них различные изменения, и называется это стандартом. Все RS-протоколы можно приблизительно разделить на полудуплексные (half-duplex) и дуплексные (full-duplex). Правда, деление такое не совсем точно, т.к. тот же RS-485 может быть и полудуплексным (два провода) и дуплексным (четыре провода), они так и называются - 2-wire (2-проводный) RS-485 и 4-wire (4-проводный) RS-485. Есть еще такой вид протоколов как симплексные (simplex).

Чем эти виды протоколов различаются:

- симплексные протоколы позволяют передавать данные только в одну сторону, т.е. только с передатчика на приемник, но не обратно (например, стандартная токовая петля). Применяется в тех случаях, когда надо просто передать информацию какому либо устройству без необходимости подтверждения и обратной связи.
- полудуплексные протоколы снимают главное ограничение симплексных протоколов - односторонняя связь. Они позволяют двум устройствам обмениваться информацией, причем оба устройства могут быть и приемниками и передатчиками, но не одновременно! Т.е. каждое устройство может либо передавать, либо принимать (кстати, классический /рекомендованный/ RS-485 именно полудуплексный).
- дуплексные протоколы наиболее продвинутые протоколы. Применение дуплексного протокола позволяет и прием и передачу информации одновременно, т.е. оба устройства могут быть и приемником и передатчиком одновременно. Например, RS-232 - дуплексный протокол.

Наиболее используемыми являются два протокола - RS-232 и RS-485. Важное отличие: протокол RS-232 использует небалансный (unbalanced) сигнал, в то время как RS-422/RS-485 используют балансный (balanced) сигнал.

Небалансный сигнал передается по несбалансированной линии, представляющей собой сигнальную землю и одиночный сигнальный провод, уровень напряжения на котором используется, чтобы передать или получить двоичные 1 или 0. Напротив, балансный сигнал передается по сбалансированной линии, которая представлена сигнальной землей и парой проводов, разница напряжений между которыми используется для передачи/приема бинарной информации (все вместе составляет экранированную витую пару).

Сбалансированный сигнал передается быстрее и дальше, чем несбалансированный. В таблице 8.1 приведены сравнительные характеристики рекомендованных протоколов.

Все оборудование, соединяемое по RS-232 протоколу, разделяют на DCE (Data Communication Equipment, оборудование Передачи Данных) и DTE (Data Terminal Equipment, Терминальное Оборудование), нельзя соединить два DTE или два DCE. Различие заключается в разъемах и разводке разъемов. Существенным ограничением является то, что по данному протоколу можно передавать информацию только от одного устройства.

Стандарт на RS-485 предусматривает 32 пары передатчик/приемник, но производители расширили возможности RS-485 протокола, так что теперь он поддерживает от 128 до 255 устройств на одной линии, а используя репитеры можно продлевать RS-485/RS-422 практически до бесконечности. При использовании RS-485 можно, и в случае длинного провода

Таблица 8.1

	RS-232	RS-422	RS-485
Соединения	Одиночный провод	Одиночный провод/много соединений допустимо	Много соединений допустимо
Количество устройств	1 передатчик 1 приемник	5 передатчиков 10 приемников на 1 передатчик	32 передатчика 32 приемника
Вид протокола	дуплексный	дуплексный	полудуплексный
Макс. длина провода	~15.25 м. при 19.2Kbps	~1220 м. при 100Kbps	~1220 м. при 100Kbps
Макс. скорость передачи	19.2Kbps для 15 м.	10Mbps для 15 м.	10Mbps для 15 м.
Сигнал	небалансный	балансный	балансный
двоичная 1	-5В мин. -15В макс.	2В мин. (B>A) 6В макс. (B>A)	1.5В мин. (B>A) 5В макс. (B>A)
двоичный 0	5В мин. 15В макс.	2В мин. (A>B) 6В макс. (A>B)	1.5В мин. (A>B) 5В макс. (A>B)
Мин. входное напряжение	+/- 3В	0.2В диф.	0.2В диф.
Выходной ток	500мА	150мА	250мА

и/или большого количества устройств необходимо, использовать терминаторы, которые впрочем, обычно встроены в устройства с RS-485 протоколом, хотя при коротком проводе, может наблюдаться даже ухудшение связи при использовании терминаторов. Так же стандарт на RS-485 предусматривает использование двухжильной экранированной витой пары, так называемый 2-wire RS-485, но

возможно использование и четырех проводной витой пары (4-wire RS-485), тогда получается полный дуплекс. В таком случае, необходимо чтобы одно из устройств было сконфигурировано как ведущее (Master), а остальные как ведомые (Slave). Тогда все ведомые устройства общаются только с ведущим устройством, и никогда не передают ничего напрямую друг другу. В таких случаях обычно RS-422 драйвер используется как ведущее устройство, т.к. RS-422 допускает подключения только как master/slave, а RS-485 устройства как ведомые, для общего удешевления системы. Стандарт на RS-422 изначально предусматривает использование четырехжильной экранированной витой пары, но допускает соединения только от одного устройства к другим (до пяти драйверов и до десяти ресиверов на каждый драйвер). В принципе, RS-422 был придуман для замены RS-232 в тех случаях, когда RS-232 не удовлетворяет по скорости и дальности передачи.

RS-422 использует строго разделенные две (или больше) пары проводов: одну пару для приема, одну для передачи (и еще по одной на каждый сигнал контроля/подтверждения (control/handshake)). RS-485, благодаря наличию третьего состояния ("tristate") позволяет обойтись одной парой проводов, что снижает общую стоимость системы при обеспечении связи на большие расстояния. Надо сказать, что сейчас доступно большое количество разнообразных устройств для сопряжения RS-422/RS-485 с RS-232, причем RS-232 часто используется для соединения с компьютером (впрочем, есть и интерфейсные карты RS-422/RS-485 в компьютер), который используется для управления системой. Так же доступны разнообразные устройства (хабы, репитеры, переключатели и пр.) для создания сложных конфигураций RS-422/RS-485 сетей, так что RS-422/RS-485 таят в себе очень большие возможности.

Протокол передачи данных HART. Протокол HART - широко известный промышленный стандарт для усовершенствования токовой петли 4-20 мА до возможности цифровой коммуникации. Протокол HART позволяет передавать одновременно аналоговый и цифровой сигнал по одной и той же паре проводов. При этом сохраняется полная совместимость и надежность существующих аналоговых линий 4-20 мА.

Фактически, датчики с HART можно ставить на место аналоговых и с помощью средств HART-коммуникации использовать все преимущества цифрового обмена уже в существующих аналоговых системах.

Удаленная диагностика и настройка

Технический персонал может дистанционно осуществлять диагностику и настройку полевых приборов, используя для этого коммунитор или компьютер с соответствующим программным обеспечением. Это особенно удобно в зимний период времени, когда датчики расположены в труднодоступных местах, на больших расстояниях друг от друга, а так же в условиях вредных или опасных производств.

Объединение интеллектуальных датчиков в систему с цифровой передачей данных позволяет сократить расходы на кабельную продукцию, установку, наладку и на текущее техническое обслуживание.

HART-протокол удобен при работе с многопараметрическими приборами (например, расходомерами), т.к. позволяет получать информацию о нескольких переменных процесса по одной паре проводов.

Непрерывная самодиагностика обеспечивает высокую надежность оборудования. Информация о состоянии прибора передается в каждом сообщении от устройства.

HART протокол использует принцип частотной модуляции для обмена данными на скорости 1200 Бод. Схема, поясняющая работу приборов по HART протоколу, представлена на рисунок 6.5.

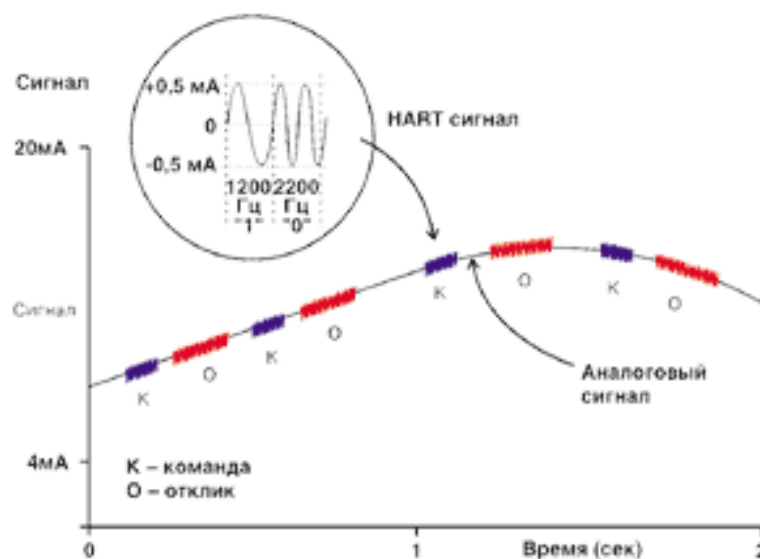


Рисунок 6.5. Принцип обмена данными по HART-протоколу

Для передачи логической "1" HART использует один полный период частоты 1200 Гц, а для передачи логического "0" - два неполных периода 2200 Гц.

Как видно на рисунке, HART составляющая накладывается на токовую петлю 4-20 мА. Поскольку среднее значение синусоиды за период равно "0", то HART сигнал никак не влияет на аналоговый сигнал 4-20 мА.

HART протокол построен по принципу "главный - подчиненный", то есть полевое устройство отвечает по запросу системы. Протокол допускает наличие двух управляющих устройств (управляющая система и коммуникатор).

Существует два режима работы датчиков, поддерживающих обмен данными по HART протоколу.

Режим передачи цифровой информации одновременно с аналоговым сигналом представлен на рисунке 6.6. Обычно в этом режиме датчик работает в аналоговых АСУ ТП, а обмен по HART-протоколу осуществляется посредством HART коммуникатора или компьютера. При этом можно удаленно (расстояние до 3000м) осуществлять полную настройку и конфигурирование датчика. Теперь

оператору нет необходимости обходить все датчики на предприятии, он может их настроить непосредственно со своего рабочего места.



Рисунок 6.6 – Режим передачи цифровой информации одновременно с аналоговым сигналом

В многоточечном режиме (рисунок 6.7) датчик передает и получает информацию только в цифровом виде. Аналоговый выход автоматически фиксируется на минимальном значении (только питание устройства - 4 мА) и не содержит информации об измеряемой величине. Информация о переменных процесса считывается по HART-протоколу.

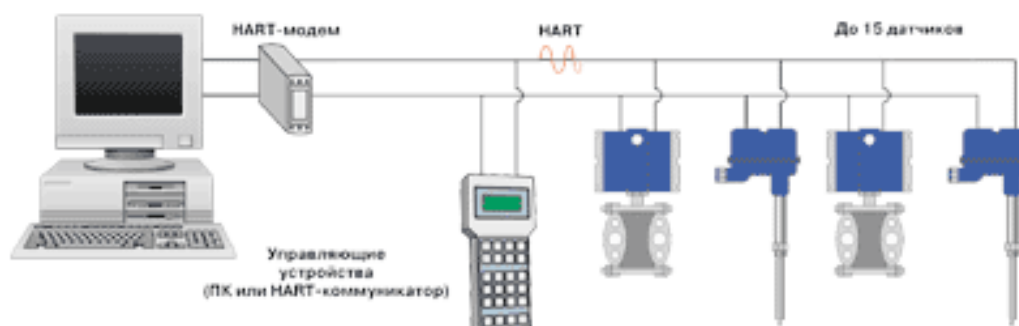


Рисунок 6.7 – Многоточечный режим работы датчиков

К одной паре проводов может быть подключено до 15 датчиков. Их количество определяется длиной и качеством линии, а так же мощностью блока питания датчиков. Все датчики в многоточечном режиме имеют свой уникальный адрес от 1 до 15, и обращение к каждому идет по соответствующему адресу. Коммуникатор или система управления определяет все датчики, подключенные к линии, и может работать с любым из них.

Обычно в аналоговой АСУТП присутствует множество интеллектуальных полевых приборов, работающих в режиме 4-20мА + HART. В этом случае удаленная настройка и конфигурирование датчиков при помощи HART-

коммуникатора или HART-модема требует последовательного подключения коммуникационного устройства к каждой линии 4-20 мА, идущей от соответствующих приборов. Для решения поставленной задачи предлагается использовать HART-мультиплексор. При таком подходе приборы продолжают передавать измерительную информацию в систему по токовому выходу 4-20 мА, а их конфигурация может быть изменена с одного цифрового выхода управляющей системы. Связь мультиплексора с системой управления осуществляется по интерфейсу RS485 или RS232. При этом можно объединить в сеть около 500 приборов (например, 30 мультиплексоров соединенных по RS485, 16 каналов каждый). Структурная схема работы мультиплексора в аналоговой системе представлена на рисунке 4 (линии 2,3,...n).

Существует возможность построения с помощью мультиплексора цифровой системы сбора и визуализации информации. В этом случае каждый канал мультиплексора может опрашивать до 15 датчиков, подключенных к одной токовой петле. При таком подключении затраты на кабельную продукцию существенно снижаются (рисунок 6.8, линия 1).

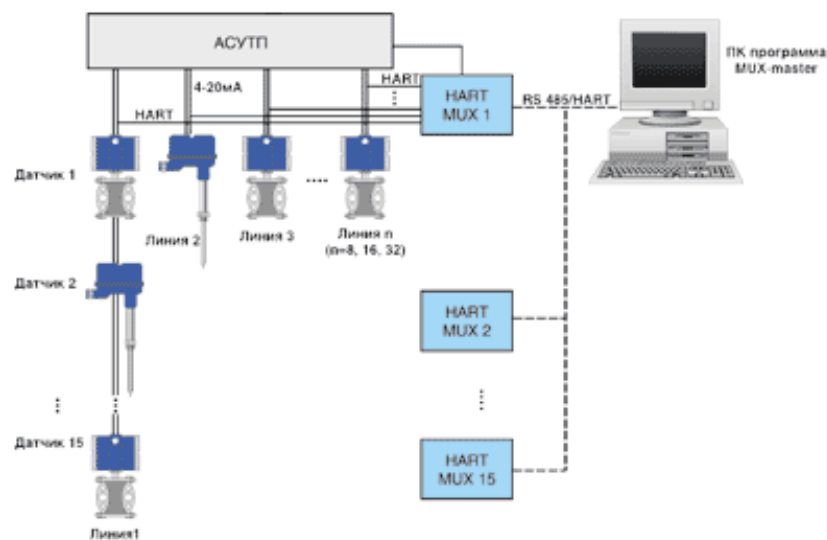


Рисунок 6.8 – Управление полевыми приборами через мультиплексор

Коммуникатор или HART-система используется, если необходимо:

- перенастраивать диапазон прибора;
- подстраивать ноль;
- выявлять причины неисправности прибора или линии связи;
- читать номер прибора, дату его последней калибровки и другие параметры;
- делать калибровку сенсора;
- осуществлять настройку приборов из диспетчерской;
- получать оперативную информацию о состоянии приборов;
- осуществлять постоянный контроль параметров;

- создавать архивы процесса.

II. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Перечень тем практических занятий

1. Контактные методы измерения температуры: жидкостные термометры, манометрические термометры, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры.
2. Вторичные преобразователи термометров сопротивления и термоэлектрических термометров.
3. Бесконтактные методы измерения температуры.
4. Измерение давления среды.
5. Измерение уровня в барабане котла.
6. Методы измерения расхода среды.
7. Измерение состава газовых смесей.

Перечень тем лабораторных работ

1. Изучение принципа действия, конструкции и поверка термоэлектрических преобразователей.
2. Изучение принципа действия, конструкции и поверки термометров сопротивления.
3. Изучение принципа действия инфракрасного бесконтактного термометра.
4. Изучение принципа действия, устройства и поверки нормирующего преобразователя.
5. Устройство, принцип действия и поверка милливольтметров и логометров.
6. Определение динамических свойств датчиков температуры.
7. Устройство и принцип действия деформационных, тензометрических и грузопоршневых манометров. Поверка деформационного манометра.
8. Расходомеры переменного перепада давления. Определение коэффициента расхода сдвоенной диафрагмы.
9. Устройство и принцип действия электрохимических газоанализаторов на твердом электролите.
10. Изучение систем дистанционной передачи информации. Определение характеристики дифференциально-трансформаторной системы.
11. Изучение принципа действия преобразователя теплового потока.
12. Изучение принципа действия и конструкции влагомера твердых и сыпучих тел.

Основные задачи, решаемые на практических занятиях

ЗАДАЧА 1. Температура в термостате измерялась техническим термометром со шкалой 0-300°C, имеющем пределы допускаемой основной погрешности $\pm 3^\circ\text{C}$. Показания термометра составили 146°C. Одновременно с техническим термометром в термостат был погружен лабораторный термометр. Показания лабораторного термометра составили 152°C (поправка по свидетельству поверки составляет -1°C , поправка на выступающий столбик до $+0,5^\circ\text{C}$). Определить, выходит ли за пределы допускаемой основной погрешности действительное значение погрешности показаний технического термометра.

РЕШЕНИЕ.

Для технического термометра можно определить только интервал, в котором находится действительное значение температуры - $146 \pm 3^\circ\text{C}$, то есть 143...149°C. Для лабораторного термометра известны значения поправок, поэтому по его показаниям может быть определена действительная температура.

$$t_g = 152 - 1 + 0,5 = 151,5^\circ\text{C}$$

Отсюда видно, что действительная погрешность технического термометра выходит за допускаемые пределы.

ЗАДАЧА 2. Милливольтметр имеет равномерную шкалу, разделенную на 50 интервалов. Нижний предел измерения $U_n = -10\text{мВ}$, верхний $U_v = +10\text{мВ}$. Определить цену деления шкалы и чувствительность милливольтметра.

РЕШЕНИЕ:

Стрелка милливольтметра перемещается с одной отметки шкалы на соседнюю при изменении входного напряжения на ΔU :

$$\Delta U = \frac{U_v - U_n}{N} = \frac{10 - (-10)}{50} = 0,4\text{мВ}.$$

Следовательно, цена деления $K = 0,4\text{мВ}$. Отсюда, чувствительность S милливольтметра равна:

$$S = 1/K = 1/0,4 = 2,5\text{мВ}^{-1}.$$

ЗАДАЧА 3. Определите абсолютное и относительное изменения показаний манометрического термометра, вызванное изменением барометрического давления от 100,45 до 96,45 кПа. Шкала прибора 0-100°C, что соответствует изменению давления от 0,67 до 0,92 МПа. Прибор показывает температуру 80°C. Шкала прибора равномерная.

ЗАДАЧА 4. Оцените абсолютную погрешность измерения энтальпии перегретого пара при температуре $t = 600^\circ\text{C}$ и давлении $P = 100\text{кгс/см}^2$. Абсолютная

погрешность измерения соответственно температуры $\Delta t = \pm 8^\circ\text{C}$ и давления $\Delta p = \pm 1,5 \text{ кгс/см}^2$ ($\partial V / \partial p = -0,5 \frac{\text{ккал/кг}}{\text{кгс/см}^2}$; $\partial i / \partial t = 0,575 \frac{\text{ккал/кг}}{^\circ\text{C}}$).

ЗАДАЧА 5. Определите допускаемую абсолютную погрешность измерения комплекта, включающего термоэлектрический термометр, нормирующий преобразователь и самопишущий прибор. Причем, допускаемая абсолютная погрешность термоэлектрического термометра равна $2,0^\circ\text{C}$. Нормирующий преобразователь имеет класс точности 0,5, самопишущий прибор – класс точности 1,0. Диапазон измерения комплекта 200 – 600 $^\circ\text{C}$. Принять, что погрешности независимы и носят случайный характер.

ЗАДАЧА 6. Измерение мощности производилось по показаниям амперметра и вольтметра. Эти приборы имеют класс точности 0,25 и имеют соответственно шкалы 0-10А и 0-40В. Оцените погрешность, с которой производится измерение мощности, если амперметр показывает 4А, а вольтметр 20В.

ЗАДАЧА 7. Определите границы доверительного интервала погрешности измерения температуры с вероятностью 0,95, если $m_t = 900^\circ\text{C}$, а дисперсия $D_t = 49 (^\circ\text{C})^2$.

ЗАДАЧА 8. При измерении ЭДС был определен доверительный интервал $16,9 \leq m_t \leq 17,5$ мВ, с доверительной вероятностью 0,997. Определите среднеквадратичную погрешность.

ЗАДАЧА 9. В результате проведенных измерений было получено, что наиболее вероятная концентрация O_2 в газовой смеси составляет 7,5 % об. Доверительный интервал составил $\pm 0,25$ % об. O_2 для доверительной вероятности 0,683. Определите границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0,95.

ЗАДАЧА 10. Лабораторный стеклянный термометр, заполненный ртутью показывает по шкале 120 $^\circ\text{C}$. Термометр погружен в измеряемую среду до отметки 50 $^\circ\text{C}$. Температура выступающего столбика составляет 20 $^\circ\text{C}$. Коэффициент видимого объемного теплового расширения ртути в стекле $\alpha_v = 0,00018 \text{ K}^{-1}$. Определите действительное значение температуры.

РЕШЕНИЕ.

Показания термометра отличаются от действительной температуры за счет выступающего столбика. Поправка на выступающий столбик подсчитывается по формуле

$$\Delta t = \alpha_v (t - t_{\text{в.с.}}) n,$$

где α_v – коэффициент видимого объемного теплового расширения ртути в стекле;
 t – температура, показываемая термометром, $^\circ\text{C}$;
 $t_{\text{в.с.}}$ – температура выступающего столбика, $^\circ\text{C}$;

n – число градусов в выступающем столбике.

Следовательно,

$$\Delta t = 0,00018(120 - 20)(120 - 50) = 1,26 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Определим действительную температуру:

$$t_d = 120 + 1,26 = 121,26 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

ЗАДАЧА 11. Медный термометр сопротивления при $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет сопротивление $R_{20} = 1,75 \text{ Ом}$. Определите его сопротивление при 100 и $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Температурный коэффициент $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

РЕШЕНИЕ.

Сопротивление R_t медного термометра при температуре t , $^{\circ}\text{C}$, определяется по формуле

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

где R_0 – сопротивление при $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

α – температурный коэффициент, K^{-1} ;

t – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Если известно сопротивление R_{t_1} при температуре t_1 , то для определения сопротивления R_{t_2} при температуре t_2 нужно предварительно определить R_0 , а затем по найденному R_0 определить R_{t_2} :

$$R_{t_2} = R_0(1 + \alpha t_2),$$

$$\text{где } R_0 = \frac{R_{t_1}}{1 + \alpha t_1}.$$

Для нашего случая $R_{100} = 2,3 \text{ Ом}$, $R_{150} = 2,64 \text{ Ом}$.

ЗАДАЧА 12. Определите показания манометрического ртутного термометра, если при градуировке термобаллон и показывающий прибор находились на одном уровне, а в реальных условиях показывающий прибор расположен на $7,37 \text{ м}$ выше, чем термобаллон. Шкала термометра $0-500^{\circ}\text{C}$. При изменении температуры от 0 до 500°C давление в системе изменяется от $4,47$ до $14,28 \text{ МПа}$. Плотность ртути $\rho = 13595 \text{ кг/м}^3$.

РЕШЕНИЕ.

Давление, подводимое к показывающему прибору, будет определяться как давление в термобаллоне минус давление столба жидкости, определяемое разностью уровней расположения термобаллона и показывающего прибора:

$$\Delta p = \rho g \Delta H = 7,37 \cdot 13595 \cdot 9,81 = 0,98 \text{ МПа}.$$

Таким образом, показания прибора будут занижены на 0,98 МПа относительно действительного значения в термобаллоне. Определим чувствительность манометрического термометра:

$$S = \frac{p_k - p_n}{t_k - t_n} = \frac{14,28 - 4,47}{500 - 0} = 0,0196 \text{ МПа/}^\circ\text{C}.$$

Определим изменение показаний манометра, вызванное различием во взаимном расположении термобаллона и измерительного прибора:

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{S} = \frac{0,98}{0,0196} = 50^\circ\text{C}.$$

Значит, показания манометрического термометра будут занижены на 50°C.

ЗАДАЧА 13. Термоэлектрический термометр типа S (платинородий-платиновый) подключен к измерительному прибору медными проводами. Температура горячего спае 700°C, холодных спаев 20°C. Изменится ли термо-ЭДС, если температура места подключения медного провода к платинородиевому термоэлектроду увеличилась до 100°C, а температура места подключения медного провода к платиновому термоэлектроду осталась равной 20°C. Для термометра типа S (платинородий-платиновый) $E(700^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 6,274 \text{ мВ}$, $E(20^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 0,113 \text{ мВ}$, термо-ЭДС пары платинородий-медь при температурах спаев 100°C и 20°C $E(100^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}) = -0,077 \text{ мВ}$.

РЕШЕНИЕ.

Термо-ЭДС E'' , действующая в цепи, изменится на E' :

$$E'' = E(700^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) - E'(100^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}) = 6,274 - 0,113 + 0,077 = 6,238 \text{ мВ}.$$

ЗАДАЧА 14. Критерий чистоты металла медного термометра сопротивления градуировки 50М равен 1,428. Определите сопротивление этого термометра при 80 °C.

ЗАДАЧА 15. Температура газохода $t = 1100^\circ\text{C}$ измеряется тремя пирометрами яркостным, радиационным и цветовым. При этом для яркостного пирометра $\varepsilon_\lambda = 0,75$ при $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$, радиационного пирометра $\varepsilon_\tau = 0,38$, а для цветового пирометра $\varepsilon_\lambda = 0,358$ ($\lambda = 0,65 \text{ мкм}$), $\varepsilon_{\lambda_2} = 0,39$ ($\lambda_2 = 0,45 \text{ мкм}$). Что покажет каждый из пирометров?

ЗАДАЧА 16. Температура пара измеряется термоэлектрическим термометром типа хромель-алюмель, который с помощью удлиняющих термоэлектродных проводов подключен к милливольтметру. Милливольтметр установлен в помещении блочного щита, имеющего температуру 20°C.

Сопротивление милливольтметра 323 Ом, термометра в рабочих условиях 0,35 Ом. Подгонка сопротивления внешней линии до значения 5 Ом осуществляется при температуре 20°C. Сопротивление удлиняющих термоэлектродных проводов 3,47 Ом при общей длине 150 м (в том числе 3 м внутри блочного щита). Оцените относительное изменение показаний милливольтметра, вызванное изменением температуры проводов от 20°C до 65°C. Температурный коэффициент электрического сопротивления проводов $\alpha = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

РЕШЕНИЕ.

При температуре удлиняющих термоэлектродных проводов 20°C сопротивление внешней линии составляет 5 Ом, а общее сопротивление всей измерительной цепи $R_0 = 328 \text{ Ом}$.

При температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ сопротивление части удлиняющих термоэлектродных проводов, находящихся вне блочного щита составит

$$R'_y = 3,47 \cdot \frac{147}{150} = 3,4 \text{ Ом}.$$

При температуре $t_2 = 65^\circ\text{C}$ сопротивление этой части будет равно

$$R''_y = R'_y \frac{1 + \alpha t''}{1 + \alpha t'} = 3,40 \frac{1 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 65}{1 + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 20} = 3,75 \text{ Ом}.$$

Следовательно, общее сопротивление цепи увеличилось на $\Delta R_0 = 3,75 - 3,40 = 0,35 \text{ Ом}$ и стало равным $R'_1 = 328,35 \text{ Ом}$.

Относительное изменение показаний милливольтметра определяется по формуле

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{R_0 - R'_0}{R'_0} \cdot 100\% = \frac{328 - 328,35}{328,35} \cdot 100\% = -0,11\%.$$

В абсолютных единицах для термоэлектрического термометра типа К при $t = 540^\circ\text{C}$ погрешность равна $\Delta t = -0,6^\circ\text{C}$.

Незначительная погрешность объясняется тем, что сопротивление удлиняющих термоэлектродных проводов на два порядка меньше сопротивления милливольтметра и измерительной цепи в целом.

ЗАДАЧА 17. Измерительная схема автоматического потенциометра типа КСП-4 (рис. 3.17) градуировки ХК со шкалой 0-400 °C характеризуется следующими значениями сопротивлений и токов: $R_k = 509,5 \text{ Ом}$, $R_6 = 330 \text{ Ом}$, $R_{II} = 12 \text{ Ом}$, $R_3 = 90 \text{ Ом}$, $I_1 = 3 \text{ мА}$, $I_2 = 2 \text{ мА}$. Определите, какая точка реохорда, "с" или "d", соответствует верхнему пределу измерения.

РЕШЕНИЕ.

В потенциометрах компенсирующее напряжение должно быть равно измеряемому. Вычислим разности потенциалов между точками "с" и "а", а также "d" и "а" (см. рис. 3.17). Разность потенциалов между "с" и "а"

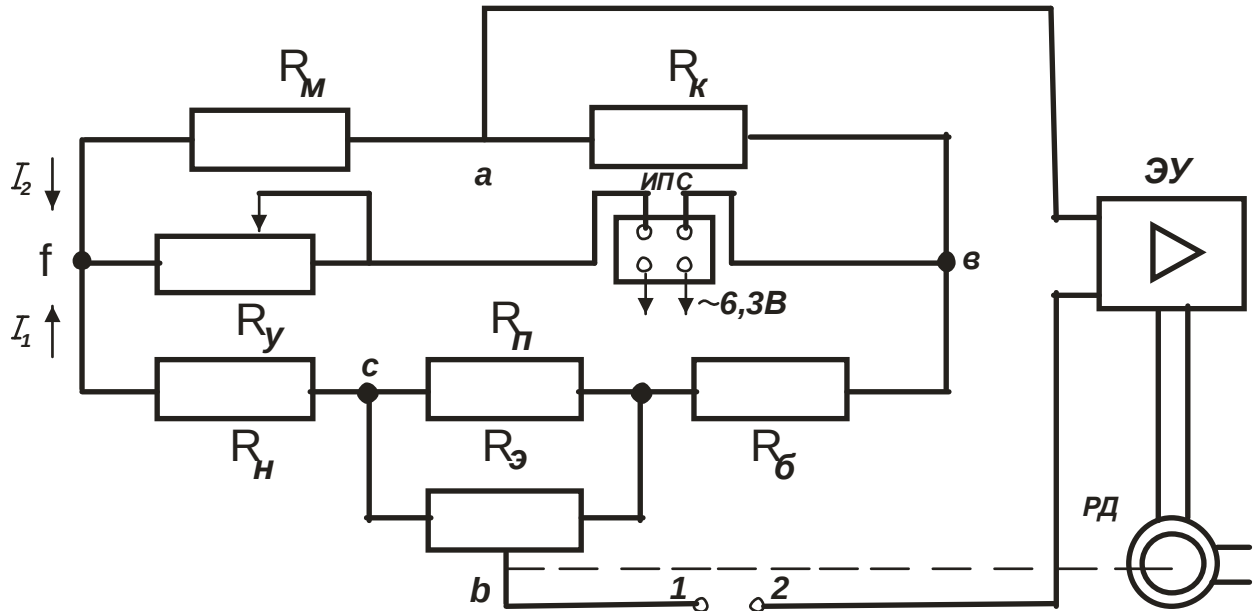


Рис. 3.17. Измерительная схема автоматического потенциометра типа КСП-4

$$U_{ca} = -I_1(R_б + R_{np}) + I_2R_K = -3(330 + 10,59) + 2 \cdot 509,5 = -2,77 \text{ мВ},$$

$$\text{где } R_{np} = \frac{R_n R_э}{R_n + R_э}.$$

Разность потенциалов между точками "d" и "а"

$$U_{da} = -I_1R_б + I_2R_K = -3 \cdot 330 + 2 \cdot 509,5 = 29 \text{ мВ}.$$

Расчет измерительной схемы потенциометра КСП-4 производится исходя из принятой температуры холодных спаев термоэлектрического термометра 30°C , т.е. начальной отметке шкалы соответствует входное напряжение $E(0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}) = -1,98 \text{ мВ}$, а конечной $E(400^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C}) = 29,51 \text{ мВ}$. Сравнивая напряжения, легко установить, что точка "d" соответствует концу шкалы.

В реальных условиях должны быть соблюдены равенства $U_{ca} = E(0^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$ и $U_{da} = E(400^\circ\text{C}, 30^\circ\text{C})$. Полученное расхождение обусловлено неучетом нерабочих участков реохорда.

ЗАДАЧА 18. Равномерна ли шкала неуравновешенного моста (рис. 3.18) при условии, что сопротивление источников питания равно нулю, а входное сопротивление измерительного прибора ИП бесконечно большое. R_t - термометр сопротивления градуировки 50М.

РЕШЕНИЕ.

Предположим, что собственно измерительный прибор ИП – милливольтметр имеет равномерную шкалу с делениями постоянной длины, и

выясним, изменяется ли чувствительность неуравновешенного моста при изменении R_t .

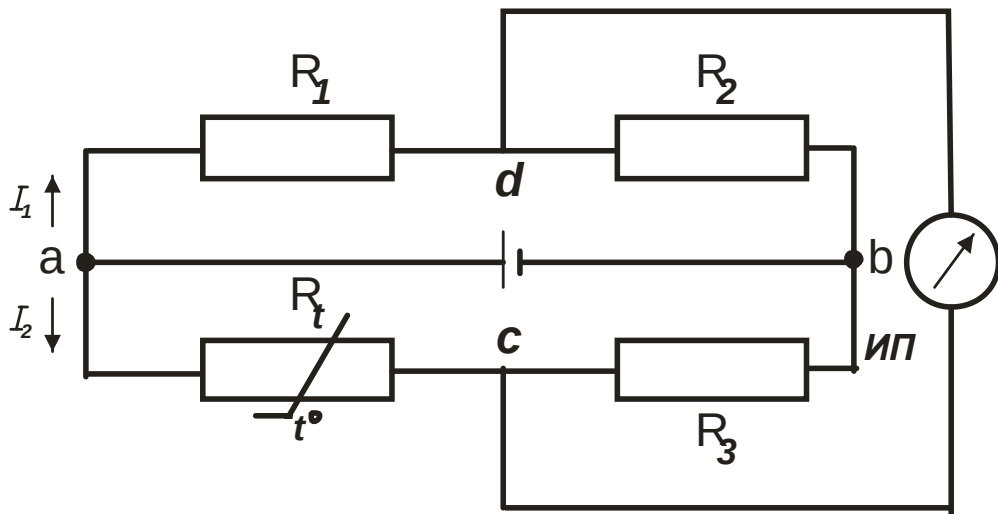


Рис. 3.18. Схема неуравновешенного моста

Выходное напряжение

$$U_{cd} = I_2 R_t - I_1 R_1,$$

$$\text{где } I_1 = \frac{E}{(R_2 + R_1)}, \quad I_2 = \frac{E}{(R_t + R_3)}.$$

Следовательно,

$$U_{cd} = \frac{ER_t}{(R_t + R_3)} - \frac{ER_1}{(R_1 + R_2)}.$$

Коэффициент преобразования собственно моста (т.е. без показывающего прибора ИП) будет следующим образом зависеть от R_t :

$$S = \frac{dU_{cd}}{dR_t} = \frac{ER_3}{(R_t + R_3)^2}.$$

Таким образом, при равномерной шкале ИП чувствительность комплекса «измерительная схема + ИП» будет зависеть от R_t , т.е. шкала будет неравномерной, даже если коэффициент преобразования термометра сопротивления будет неизменным.

ЗАДАЧА 19. Токи в рамках 1 и 2 логометра (рис. 3.19) имеют указанное на схеме направление. Индукция поля в центре слабее, чем у краев зазора. Определите, будет ли при таком направлении токов логометр работоспособным.

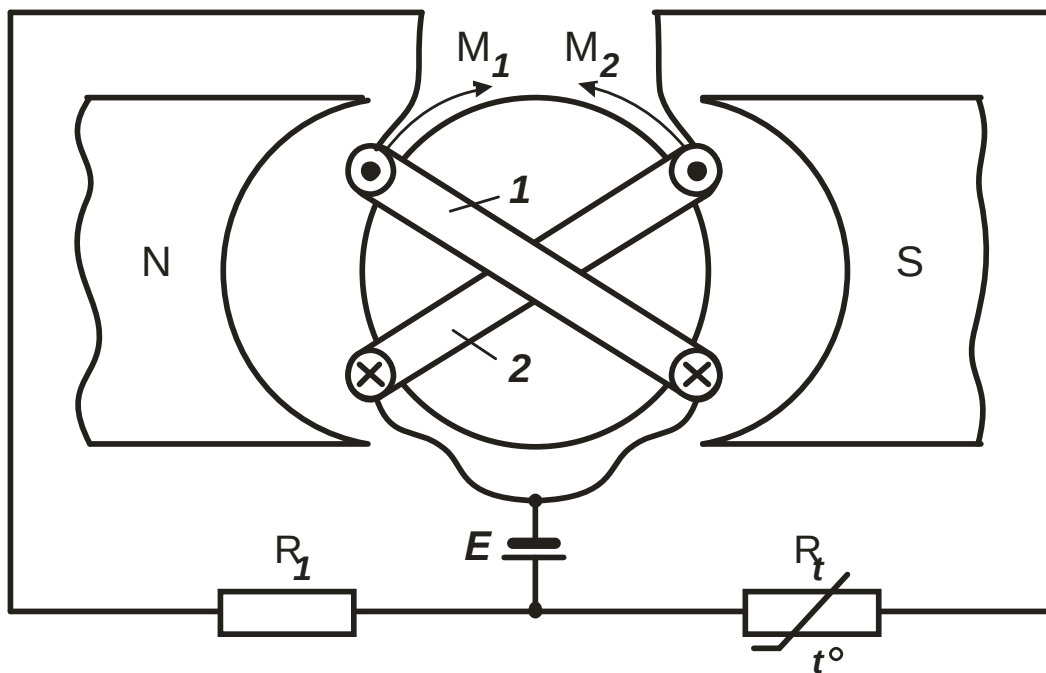


Рис. 3.19. Схема логометра (к задаче 3.4)

РЕШЕНИЕ.

Для решения вопроса о работоспособности схемы необходимо установить направление моментов рамок. В соответствии с правилом левой руки момент M_1 рамки 1 направлен по часовой стрелке, момент M_2 рамки 2, включенной последовательно с терморезистором R_t , направлен против часовой стрелки. При таком направлении моментов логометр работать не будет, так как, например, при

увеличении R_t уменьшается M_2 и рамки начнут поворачиваться по часовой стрелке. При этом момент M_1 будет увеличиваться, так как рамка 1 будет перемещаться в более сильное магнитное поле, а M_2 будет еще больше ослабевать. Следовательно, равенства моментов быть не может, и подвижная система будет поворачиваться до упора. Аналогичная картина наблюдается и при уменьшении

R_t . Чтобы схема оказалась работоспособной, M_1 должен быть направлен против часовой стрелки, а M_2 – по часовой стрелке. Для этого достаточно изменить полярность подключения батареи.

ЗАДАЧА 20. В U-образном манометре с водяным заполнением внутренние диаметры трубок соответственно равны 8 и 8,3 мм. При измерении давления уровень в первой трубке переместился на 204 мм. Измеряемое давление считалось равным 4 кПа. Оцените погрешность, вызванную неучетом реального уровня во второй трубке.

РЕШЕНИЕ.

При изменении уровня в первой трубке на $h_1 = 204$ мм из первой трубки во вторую перетекает воды (в объемных единицах)

$$V = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1.$$

Определим, насколько переместился уровень воды во второй трубке:

$$h_2 = h_1 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = 204 \left(\frac{8}{8,3} \right)^2 = 189,5 \text{ мм.}$$

Следовательно, действительное измеряемое давление

$$p_d = (h_1 + h_2) \rho g = 3,859 \text{ кПа.}$$

Погрешность измерения давления за счет неодинакового изменения уровня в первой и второй трубках

$$\delta p = \frac{p - p_d}{p_d} = \frac{4,0 - 3,859}{3,859} \cdot 100\% = 3,65\%$$

ЗАДАЧА 21. Чувствительным элементом манометра является сильфон. Уравновешивание давления (разности давлений) осуществляется за счет упругого противодействия сильфона и пружины, эффективная площадь сильфона $S_{эф} = 31,5 \text{ мм}^2$, жесткость пружины $K_n = 9,20 \text{ Н/мм}$, жесткость одного гофра сильфона к

воздействию осевого усилия $K_c = 0,25 \text{ Н/мм}$, число гофр 8. При перемещении стрелки манометра от начала до конца шкалы доншко сиффона перемещается на $h = 4,5 \text{ мм}$. Определите пределы измерения манометра.

РЕШЕНИЕ.

Суммарная жесткость пружины и сиффона

$$K_m = K_n + K_c n = 9,20 + 0,25 \cdot 8 = 11,2 \text{ Н/мм},$$

где n – число гофр.

Противодействующее усилие, создаваемое пружинной и сиффоном при сжатии их на $h = 4,5 \text{ мм}$,

$$F_{np} = K_m h = 11,2 \cdot 4,5 = 50,4 \text{ Н}.$$

Определим, какое давление на сиффон требуется, чтобы создать усилие, равное противодействующему:

$$p = F_{np} / S_{сф} = \frac{50,4}{31,5 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Следовательно, пределы измерения манометра 0-1,6 МПа.

ЗАДАЧА 22. Определите погрешность манометра с токовым выходным сигналом 0-5 мА с пределами измерения 0-4 МПа, если при измерении давления 3,2 МПа выходной сигнал составил $I = 3,93 \text{ мА}$.

РЕШЕНИЕ.

Уравнение, связывающее токовый выходной сигнал манометра с входным сигналом (давлением), имеет вид

$$I = \frac{I_{\text{макс}}}{p_{\text{макс}}} p_{\text{вх}}.$$

Определим выходной сигнал, который должен быть при $p_{\text{вх}} = 3,2 \text{ МПа}$:

$$I_d = \frac{5}{4} 3,2 = 4 \text{ мА}.$$

Определим абсолютную погрешность манометра по выходу:

$$\Delta I = I - I_d = 3,93 - 4 = -0,07 \text{ мА}.$$

Определим приведенную погрешность манометра:

$$\delta = \frac{\Delta I}{I_{\text{макс}}} = \frac{-0,07}{5} = -0,014, \text{ или } -1,4\%.$$

Определим абсолютную погрешность манометра по входу:

$$\Delta p = \delta(p_{\text{макс}} - p_{\text{мин}}) = -0,014 \cdot 4 = -0,056 \text{ МПа}.$$

ЗАДАЧА 23. Манометр, измеряющий давление пара, установлен на 5м ниже точки отбора и показывает давление $P=5\text{МПа}$. Определите действительное значение давления в паропроводе, если среднее значение температуры конденсата в импульсной линии $t=60^\circ\text{C}$ ($\rho = 985,4 \text{ кг/м}^3$)

ЗАДАЧА 24. По трубе диаметром $D = 100 \text{ мм}$ движется поток жидкости со средней скоростью $v=1,5 \text{ м/с}$. Определите массовый расход жидкости, если ее плотность $\rho=990 \text{ кг/м}^3$.

РЕШЕНИЕ.

Определяем общий расход жидкости:

$$Q_0 = v \frac{\Omega D^2}{4} = 1,5 \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,011775 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тогда, массовый расход жидкости

$$Q_{\text{ж}} = \rho \cdot Q_0 = 990 \cdot 0,011775 = 11,7 \text{ кг/с}.$$

ЗАДАЧА 25. Определите расход дымовых газов через трубопровод, если перепад на напорной трубке $\Delta P=50 \text{ кг}\cdot\text{с/м}^2$. Диаметр трубопровода $D=200 \text{ мм}$, коэффициент $K_T=0,98$, плотность $\rho=0,405 \text{ кг/м}^3$. Трубка установлена на расстоянии 24 мм от стенки трубопровода. Кинетическая вязкость газов $\nu=93,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

РЕШЕНИЕ.

Определяем скорость потока в месте установки трубки:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi_T \rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{0,98 \cdot 0,405}} = 49,7 \text{ м/с}.$$

Распределение скоростей в потоке (характер изменения отношения местной скорости v к средней v_c) является функцией цикла R_c , которое равно:

$$R_e = \frac{vD}{\nu} = \frac{49,7 \cdot 0,2}{93,6 \cdot 10^{-6}} = 10,6 \cdot 10^4.$$

А так как при $R_e = 4 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^6$ в точке сечения на расстоянии 0,762 от центра местная скорость равна средней скорости по сечению. Следовательно $v_c = v = 49,7$ м/с.

Тогда , объемный расход газа:

$$Q_o = v_c \frac{\pi D^2}{4} = 49,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} = 1,56 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

ЗАДАЧА 26. Расход воды в трубопровод диаметром $D=80$ мм измеряется диафрагмой с отверстием диаметром $d=58$ мм. Температура воды 150°C , давление воды 2 МПа, перепад давления на диафрагме $0,04$ МПа. Определите, как изменится действительное значение расхода, если температура воды станет 20°C . Диаметр трубопровода, коэффициент расхода и перепад давления на диафрагме считаем неизвестными $K_t=1,0023$.

РЕШЕНИЕ.

Рассмотрим общее уравнение массового расхода для несжимаемой жидкости:

$$Q_o = \alpha F_o \sqrt{2\Delta P \rho}.$$

По условию задачи все параметры, входящие в уравнение, остались постоянными, кроме F_o и ρ .

При $t_1=20^\circ\text{C}$ расход Q_1 равен:

$$Q_1 = \alpha \frac{\pi}{4} d_1^2 \sqrt{2\Delta P \rho_1}.$$

При $t_2=150^\circ\text{C}$ расход Q_2 равен:

$$Q_2 = \alpha \frac{\pi}{4} d_2^2 \sqrt{2\Delta P \rho_2}.$$

Получаем

$$Q_1 = Q_2 \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} = Q_2 \frac{1}{\left(k_t' \right)^2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = 1 - \frac{1}{(k_t')^2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}.$$

Определяем ρ_1 и ρ_2 для воды при $p=2\text{МПа}$; $t_1=20^\circ\text{C}$ и $t_2=150^\circ\text{C}$: $\rho_1=999\text{ кг/м}^3$; $\rho_2=917,8\text{ кг/м}^3$.

Тогда относительная погрешность измерения

$$\delta = 1 - \frac{1}{1,0023^2} \sqrt{\frac{999}{917,8}} = 1 - 1,0386 = -0,0386 (\delta = 3,9\%).$$

ЗАДАЧА 27. По трубопроводу протекает вода при $p=100\text{ кгс/см}^2$ и $t=200^\circ\text{C}$. Предельный расход воды $Q_{\text{пр}}=100\text{ т/ч}$. Диаметр трубопровода при $t=20^\circ\text{C}$ $D_{20}=200\text{ мм}$. В трубопроводе установлены диафрагма и сопло. Относительные площади их таковы, что при указанном расходе перепад давления на обоих сужающих устройствах одинаков и равен 400 кгс/м^2 . Имеет ли в этом случае какое-либо из указанных сужающих устройств преимущество (на трубопроводе перед сужающими устройствами установлены колена)?

РЕШЕНИЕ.

Количественная оценка преимущества какого-либо сужающего устройства может производиться по потере давления и длине прямых участков. Определяем эти параметры для сопла и диафрагмы:

$$m_\alpha = \frac{Q_{\text{пр}}}{0,01252 D^2 \sqrt{\rho \Delta p}} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,01252 \cdot 200^2 \sqrt{8797 \cdot 400}} = 0,338.$$

Для сопла $m=0,33$. Относительная потеря давления $p_n/\Delta p=0,46$.

Абсолютная потеря давления: $p_n=0,46 \cdot 400=184\text{ кгс/м}^2=1,8\text{ кПа}$.

При наличии колена перед соплом между ними должен быть прямой участок длиной L_1 :

$$L_1/D_{20}=17; L_1=3400\text{ мм}.$$

Для диафрагмы $m=0,487$; потеря давления $p_n/\Delta p=0,48$; $p_n=0,48 \cdot 400=192\text{ кгс/м}^2=1,88\text{ кПа}$.

Длина прямого участка $L_1/D_{20}=27$; $L_1=5400\text{ мм}$. Следовательно, при одних и тех же значениях расхода и перепада давления потери давления в диафрагме и сопле приблизительно одинаковы (у сопла m получается меньшим). Однако при этих условиях для сопла требуются более короткие прямые участки трубопровода.

ЗАДАЧА 28. Для измерения ЭДС электромагнитного расходомера предполагается использовать милливольтметр со шкалой 0 - 20мВ и входным сопротивлением $R_{мВ}=200$ Ом; ЭДС расходомера 15 мВ, измеряемая среда - вода, сопротивление воды между электродами преобразователя $R=10$ МОм. Определите погрешность измерения ЭДС (погрешностью самого милливольтметра пренебрегаем).

РЕШЕНИЕ.

Милливольтметр показывает напряжение U на его входных зажимах, которое связано с ЭДС источника соотношением

$$U = E \frac{R_{мВ}}{R_{мВ} + R} = \frac{E}{1 + \frac{R}{R_{мВ}}} = \frac{15}{1 + \frac{10^7}{200}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ мВ}.$$

Следовательно, при измерении расхода воды показания милливольтметра будут практически равны нулю и погрешность измерения $\delta \approx 100\%$. Это связано с тем, что почти вся ЭДС будет “падать” на внутреннем сопротивлении. Очевидно, что для уменьшения погрешности необходимо стремиться к уменьшению внутреннего сопротивления расходомера относительно входного сопротивления измерительного прибора. Так, если бы тем же расходомером измерялся расход НСІ , то внутреннее сопротивление расходомера составляло бы около 10 Ом. При этом

$$U = \frac{15}{1 + \frac{10}{200}} = \frac{15}{1,05} = 14,3 \text{ мВ}.$$

и погрешность измерения $\delta=4,7\%$.

Для обеспечения высокой точности измерения электронный блок электромагнитного расходомера должен иметь большое сопротивление.

ЗАДАЧА 29. Определите значение ЭДС, индуцируемой в электромагнитном расходомере с диаметром проходного отверстия $d=100$ мм, при расходе воды $Q=200$ м³/ч. Индукция магнитного поля $B=0,01$ Тл.

РЕШЕНИЕ.

Определим среднюю скорость воды, проходящей через расходомер:

$$v_{ср} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 200}{3600 \cdot \pi \cdot 0,1^2} = 7,07 \text{ м/с}.$$

Значение ЭДС, индуцируемое в электромагнитном расходомере, будет

$$E = Bdv_{cp} = 0,01 \cdot 0,1 \cdot 7,07 = 7,07 \cdot 10^{-3} B = 7,07 мВ.$$

ЗАДАЧА 30. В трубопроводе диаметром 100 мм протекает вода, расход которой меняется от 0 до 300 м³/ч. Для измерения расхода установлены ультразвуковые излучатель и приемник. Расстояние между излучателем и приемником 300 мм.

Определите время прохождения ультразвуковых колебаний при распространении их “по потоку” и “против потока”. Скорость распространения звуковых колебаний в воде $c=1500$ м/с.

РЕШЕНИЕ.

Максимальная скорость воды

$$v_{max} = \frac{Q_{max} \cdot 4}{\pi D^2 \cdot 3600} = \frac{300 \cdot 4}{3600 \cdot 0,1^2} = 10,52 м / с.$$

Время прохождения звуковых колебаний “по потоку”

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v_{max}} = \frac{0,3}{1500 + 10,62} = 198,596 \cdot 10^{-6} с.$$

Время прохождения звуковых колебаний “против потока”

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v_{max}} = \frac{0,3}{1500 - 10,62} = 201,426 \cdot 10^{-6} с.$$

Время прохождения звуковых колебаний при нулевой скорости воды

$$\tau_0 = \frac{L}{c} = \frac{0,3}{1500} = 200 \cdot 10^{-6} с.$$

ЗАДАЧА 31. Выведите уравнение, связывающее фазовый сдвиг ультразвуковых колебаний со скоростью потока воды, и оцените влияние температуры на показания осевого ультразвукового фазового расходомера, если известно, что изменение температуры воды от 8 до 25°C вызывает изменение скорости звука от 1435 до 1475 м/с. Частота ультразвуковых колебаний 25 кГц, скорость потока 10 м/с, расстояние между пьезоэлементами расходомера 250 мм.

РЕШЕНИЕ

Фазовый сдвиг определяется как разность времени прохождения звука “по потоку” и “против потока”, помноженная на круговую частоту:

$$\Delta\varphi = \Delta\tau\omega = (\tau_2 - \tau_1)\omega = \left(\frac{L}{c - v} - \frac{L}{c + v} \right) \omega = \frac{2Lv\omega}{c^2 - v^2}.$$

Для $c_1=1475$ м/с

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10 \cdot 2\pi \cdot 25000}{1475^2 - 10^2} = 0,3608 \text{ рад};$$

для $c_2=1435$ м/с

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10 \cdot 2\pi \cdot 25000}{1435^2 - 10^2} = 0,3812 \text{ рад}.$$

Следовательно, относительная погрешность

$$\delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_1} = \frac{0,3812 - 0,3608}{0,3608} = 0,0565 = 5,65\%$$

Можно оценить температурный коэффициент прибора

$$\Delta_t = \frac{\delta\varphi}{\Delta t} = \frac{5,65}{17} = 0,332\% / K.$$

ЗАДАЧА 32. Определите перепад давления, создаваемый напорными трубками, если поток воды движется со скоростью 0,1 м/с, плотность воды $\rho = 985$ кг/м³, коэффициент трубки $\zeta = 0,07$.

ЗАДАЧА 33. Расход воды, протекающей по трубопроводу $D = 200$ мм, составляет $G=100$ т/ч. Относительная площадь диафрагмы $m = 0,5$, давления воды $P = 10$ МПа, температура $t = 200^\circ\text{C}$. Определите значение перепада давления на сужающем устройстве.

ЗАДАЧА 34. Уровень воды в барабане парогенератора измеряется водомерным стеклом (рисунок 1). Давление пара в барабане 10 МПа, вода в барабане находится при температуре насыщения. Действительное значение уровня $H=0,5$ м. Определите уровень в водомерном стекле h , если температура воды в водомерном стекле 150°C .

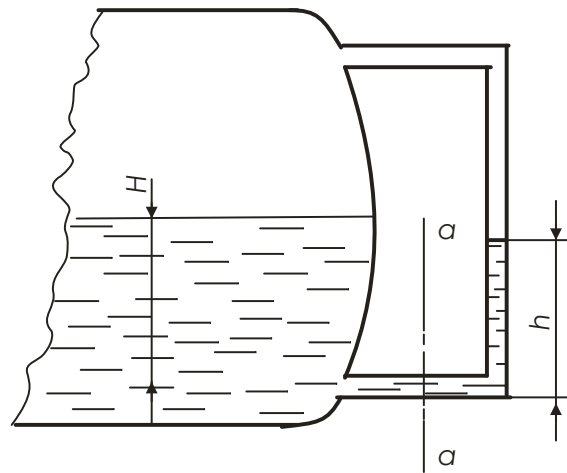


Рисунок 1 – Измерение уровня в барабане парогенератора
водомерным стеклом

РЕШЕНИЕ.

Полное давление p_1 , действующее в сечении **а-а**, со стороны барабана, определяется давлением p пара и гидростатическим давлением, создаваемым столбом H воды:

$$p_1 = p + \rho_{\text{в.н.}} gH,$$

где $\rho_{\text{в.н.}}$ – плотность воды в барабане, на линии насыщения пара при $p=10\text{МПа}$, $\rho_{\text{в.н.}}=691,9\text{ кг/м}^3$;

Полное давление p_2 , действующее в сечении **а-а** со стороны воды в водомерном стекле,

$$p_2 = p + \rho_{\text{в}} gh,$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды в водомерном стекле при $t=150^\circ\text{C}$ и $p=10\text{МПа}$, $\rho_{\text{в}}=922,1\text{ кг/м}^3$;

В статическом режиме давления p_1 и p_2 должны быть равны. Отсюда имеем

$$h = H \frac{\rho_{\text{в.н.}}}{\rho_{\text{в}}} = 0,5 \frac{691,9}{922,1} 0,375 \text{ м.}$$

Таким образом, за счет разности температур уровень воды в водомерном стекле будет занижен относительно действительного значения на 125мм, или на 25%.

ЗАДАЧА 35. Измерение уровня воды в барабане котла производится с помощью двухкамерного уравнительного сосуда (рисунок 2). Температура воды в сосуде равна температуре воды в емкости. Будет ли в этом случае изменение плотности воды влиять на показания уровнемера? Давление в барабане 0,1 МПа.

РЕШЕНИЕ.

Для решения задачи составим выражение для перепада, действующего на дифманометр при произвольном уровне H . При низком давлении в емкости плотностью пара по сравнению с плотностью воды можно пренебречь. Поэтому

$$\Delta p = \rho_{\text{в}} g (H_{\text{max}} - H).$$

Следовательно, в рассматриваемой схеме перепад, действующий на дифманометр, и, следовательно, показания уровнемера зависят не только от измеряемого уровня, но и от плотности жидкости.

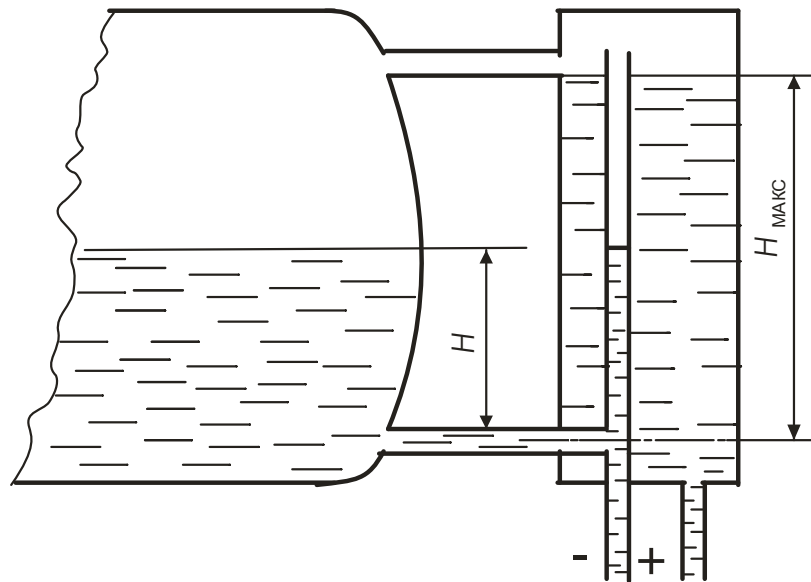


Рисунок 2 – Измерение уровня воды в барабане котла с помощью двухкамерного уравнильного сосуда

ЗАДАЧА 36. Определите вес груза и передаточное число измерительного преобразователя поплавкового механического уровнемера (рисунок 3), измеряющего уровень кислоты в емкости в интервале от 0 до 500 мм.

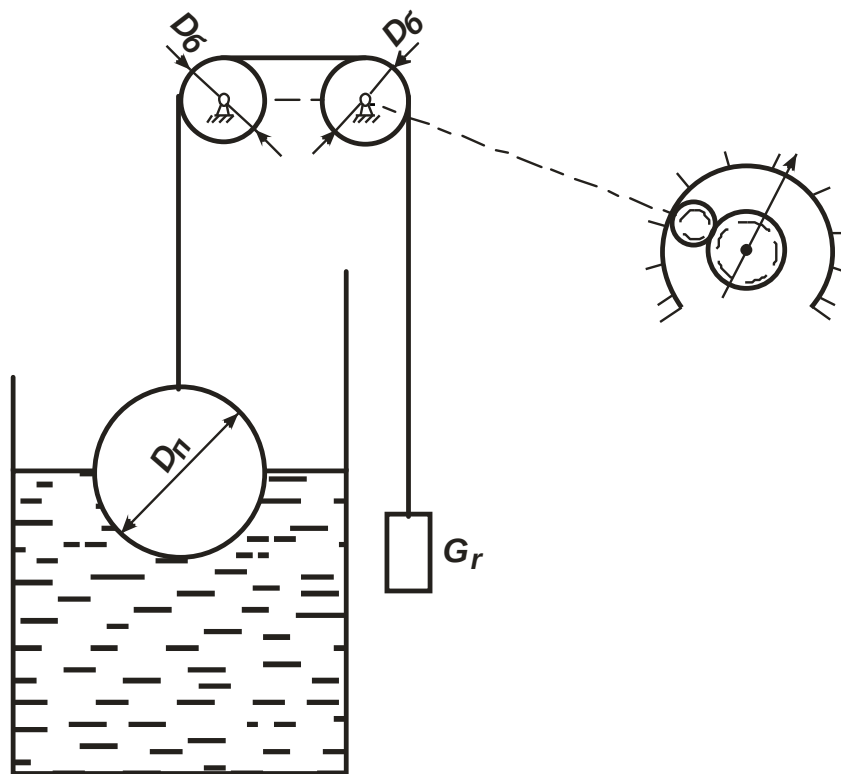


Рисунок 3 – Поплавковый механический уровнемер

Плотность кислоты $\rho_k = 1230 \text{ кг/м}^3$, диаметр шарового поплавка $D_n = 100 \text{ мм}$, материал поплавка – пластмасса с плотностью $\rho_n = 1500 \text{ кг/м}^3$, толщина стенок поплавка $b = 5 \text{ мм}$, вес троса 3 Н , сила трения в передаточном механизме не превышает $0,5 \text{ Н}$, угол поворота стрелки по шкале $\alpha = 270^\circ$, диаметр барабана, через который перекинут трос, $D_\phi = 50 \text{ мм}$.

РЕШЕНИЕ.

Проверим плавучесть поплавка. Вес поплавка

$$G = V_n \rho_n g = \frac{4}{3} \pi \left[\left(\frac{D_n}{2} \right)^3 - \left(\frac{D_n - 2b}{2} \right)^3 \right] \rho_n g =$$

$$= \frac{4}{3} \pi \left[\left(\frac{100}{2} \right)^3 - \left(\frac{90}{2} \right)^3 \right] \cdot 1500 \cdot 10^{-9} \cdot 9,80655 = 2,089 \text{ Н}.$$

Выталкивающая сила при полном погружении поплавка

$$F = \frac{4}{3} \pi R_n^3 \rho_k g = \frac{4}{3} \pi \cdot 50^3 \cdot 1230 \cdot 10^{-9} \cdot 9,80665 = 6,315 \text{ Н}.$$

Следовательно, поплавок будет плавать, так как $F > G$. Вес груза должен быть больше суммы веса троса, на котором подвешен поплавок, плюс сила трения. Примем его равным 4 Н .

Угол поворота барабана при перемещении поплавка на 500 мм составит

$$\varphi = \frac{\Delta H}{\pi D_\phi} 360^\circ = 1148^\circ.$$

Для преобразования такого угла поворота в перемещение стрелки от начала до конца шкалы необходимо, чтобы коэффициент преобразования (передаточное число) системы передачи был равен

$$n = \frac{\varphi}{\alpha} = \frac{1148}{270} = 4,25.$$

ЗАДАЧА 37. Для условий задачи 34 определите, как изменится погрешность измерения уровня, если перед измерением водомерное стекло было продуто и температура воды в стекле стала $t = 300^\circ \text{С}$.

ЗАДАЧА 38. Как изменятся показания уровнемера, отградуированного при давлении $0,1 \text{ МПа}$ (условие задачи 35), если давление насыщения в барабане поднимется до 10 МПа ?

ЗАДАЧА 39. Анализ содержания углекислого газа в продуктах горения осуществляется термокондуктометрическим газоанализатором.

Определите, как изменится температура чувствительного элемента (нити) газоанализатора, если через него первоначально пропусклся воздух (температура нити 80°C), а затем стали пропускаться продукты горения со следующим содержанием компонентов: кислород - 4%, углекислый газ - 15%, азот - 63%, водяные пары - 18%.

РЕШЕНИЕ.

Если предположить, что количество теплоты, отдаваемой чувствительным элементом к стенкам камеры, не изменяется, что для конкретной камеры

$$\lambda_{\text{в}}(t_{\text{н1}} - t_{\text{с}}) = \lambda_{\text{г}}(t_{\text{н2}} - t_{\text{с}}),$$

где $\lambda_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{г}}$ - теплопроводность воздуха и продуктов горения, Вт/м·К;

$t_{\text{н1}}$ и $t_{\text{н2}}$ - соответственно температура нити, находящейся в воздухе и газовой смеси, $^{\circ}\text{C}$.

Отсюда

$$\lambda_{\text{в}}/\lambda_{\text{г}} = (t_{\text{н2}} - t_{\text{с}})/(t_{\text{н1}} - t_{\text{с}}).$$

Теплопроводность смеси может быть определена из выражения

$$\lambda_{\text{г}} = \sum \lambda_i C_i,$$

где λ_i - теплопроводность компонентов газовой смеси (продуктов горения), Вт/(м·К);

C_i - объемная концентрация компонентов.

Определяем значения теплопроводности компонентов газовой смеси при $t = (t_{\text{н1}} + t_{\text{с}})/2 = 50^{\circ}\text{C}$. Для воздуха

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{в}} &= \lambda_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} + \lambda_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2} = 27,73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,79 + 28,67 \cdot 10^{-3} \cdot 0,21 = \\ &= 27,93 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}) \end{aligned}$$

Объем продуктов горения в газоанализаторе уменьшается за счет практически полной конденсации водяных паров. При этом несколько меняется процентное содержание других компонентов. Теплопроводность смеси в этом случае будет определяться выражением

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{г}} &= \lambda_{\text{CO}_2} \frac{C_{\text{CO}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} - \lambda_{\text{O}_2} \frac{C_{\text{O}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} + \lambda_{\text{N}_2} \frac{C_{\text{N}_2}}{1 - C_{\text{H}_2\text{O}}} = \\ &= 18,49 \cdot 10^{-3} \frac{0,15}{1 - 0,18} + 28,67 \cdot 10^{-3} \frac{0,04}{1 - 0,18} + 27,73 \cdot 10^{-3} \frac{0,63}{1 - 0,18} = \\ &= 26,08 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.\end{aligned}$$

Определяем температуру нити при омывании ее продуктами горения:

$$t_{\text{н2}} = \frac{\lambda_{\text{Б}}}{\lambda_{\text{г}}} (t_{\text{н2}} - t_{\text{с}}) + t_{\text{с}} = \frac{27,93 \cdot 10^{-3}}{26,08 \cdot 10^{-3}} (80 - 20) + 20 = 84,26^\circ \text{C}.$$

Таким образом температура нити увеличилась на

$$84,26 - 80 = 4,26^\circ \text{C}.$$

ЗАДАЧА 40. Газоанализатор, определяющий состав смеси по теплопроводности, градуировался по синтетической смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$. Измерительная схема газоанализатора представляет собой неуравновешенный мост, образованный четырьмя одинаковыми чувствительными элементами из платиновой проволоки с сопротивлением при 0°C $R_0 = 1$ Ом. Полагаем, что зависимость сопротивления от температуры имеет вид $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Мост питается стабилизированным током $I = 350$ мА, при этом температура элементов R_1 и R_3 , находящихся в азоте, равна 80°C . Разность потенциалов в измерительной диагонали измеряется милливольтметром с бесконечно большим входным сопротивлением. Внутренний диаметр измерительной камеры $D = 6,6$ мм, диаметр чувствительного элемента, расположенного по оси камеры, $d = 0,05$ мм, его длина $l = 20$ мм, температура стенок камеры $t_{\text{с}} = 20^\circ \text{C}$.

Определите уравнение шкалы газоанализатора, если диапазон его измерения 0 - 20% CO_2 , и рассчитайте напряжение на измерительной диагонали моста при $C = 0; 5; 10; 15; 20\% \text{ CO}_2$.

РЕШЕНИЕ.

Для решения задачи необходимо установить связь между содержанием CO_2 и напряжением в измерительной диагонали моста. Количество теплоты, передаваемой в единицу времени от чувствительного элемента и стенкам камеры за счет теплопроводности определяется выражением

$$Q = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{D}{d}} (t_{\text{н}} - t_{\text{с}}),$$

где $t_{\text{н}}$ - температура нити чувствительного элемента;

λ - теплопроводность газовой смеси при $t=(t_h+t_c)/2$.

Такое же количество теплоты выделяется в чувствительном элементе:

$$Q=I^2R.$$

Таким образом, температура нити будет определяться выражением

$$t_h = t_c + \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l \lambda} I^2 R.$$

Измерение сопротивления проводника при изменении теплопроводности смеси от λ до $\lambda + \Delta\lambda$

$$\Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} I^2 R_0^2 \alpha \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right)$$

или

$$\Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{2\pi l} I^2 R_0^2 \alpha \frac{\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)}$$

Если в схеме всегда выполняются условия $R_1=R_3$ и $R_2=R_4$, то изменение напряжения на измерительной диагонали моста (при бесконечном входном напряжении милливольтметра)

$$\Delta U = \frac{1}{2} I \Delta R = \frac{\ln \frac{D}{d}}{4\pi l} I^3 R_0^2 \alpha \frac{\Delta\lambda}{\lambda(\lambda + \Delta\lambda)}.$$

Так как градуировка газоанализатора производится по синтетической смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, то для выявления уравнения шкалы нужно установить зависимость между теплопроводностью синтетической смеси λ и содержанием CO_2 в ней.

Теплопроводность смеси λ следующим образом зависит от концентрации компонентов C_i и их теплопроводности λ_i :

$$\lambda = \sum C_i \lambda_i = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + C_{\text{N}_2} \lambda_{\text{N}_2} = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + (1 - C_{\text{CO}_2}) \lambda_{\text{N}_2}$$

Если в качестве исходной принять теплопроводность азота (теплопроводность синтетической смеси с нулевым содержанием CO_2), то

$$\Delta\lambda = C_{\text{CO}_2} \lambda_{\text{CO}_2} + (1 - C_{\text{CO}_2}) \lambda_{\text{N}_2} - \lambda_{\text{N}_2} = C_{\text{CO}_2} (\lambda_{\text{CO}_2} - \lambda_{\text{N}_2}).$$

Если λ и $\Delta\lambda$ подставить в выражение

$$F_m = C\chi_0 T_0^2 \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \frac{p}{p_0} H \frac{dH}{dx},$$

то получим уравнение шкалы

$$\Delta U = \frac{\ln \frac{D}{d}}{4\pi l} I^3 R_0^2 \alpha \frac{C_{CO_2} (\lambda_{N_2} - \lambda_{CO_2})}{\lambda_{N_2} [\lambda_{N_2} - C_{CO_2} (\lambda_{N_2} - \lambda_{CO_2})]}.$$

Вид этого уравнения показывает, что зависимость изменения напряжения на измерительной диагонали ΔU от содержания CO_2 в газовой смеси имеет нелинейный характер. Проиллюстрируем это конкретными значениями. Определим значения ΔU при 0, 5, 10, 15 и 20% CO_2 :

при $C_{CO_2} = 0$ $\Delta U = 0$;

при $C_{CO_2} = 0,05$

$$\Delta U = \frac{\ln \frac{6,6}{0,05}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \cdot 35^3 \cdot 10^{-6} \cdot 1^2 \cdot 3,92 \cdot 10^{-3} \times \\ \times \frac{0,05(27,73 \cdot 10^{-3} - 18,49 \cdot 10^{-3})}{27,73 \cdot 10^{-3} - [27,73 \cdot 10^{-3} - 0,05(27,73 \cdot 10^{-3} - 18,49 \cdot 10^{-3})]} = 2 мВ$$

при $C_{CO_2} = 0,1$ $\Delta U = 4,06$ мВ;

при $C_{CO_2} = 0,15$ $\Delta U = 6,2$ мВ;

при $C_{CO_2} = 0,2$ $\Delta U = 8,4$ мВ.

ЗАДАЧА 41. Дымовые газы имеют следующий состав: кислород - 4%, углекислый газ - 15%, азот - 63%, водяные пары - 18%.

Определите, как изменится относительная магнитная восприимчивость газов если:

1) содержание O_2 увеличится на 1%, а содержание N_2 уменьшится на 1% при неизменной концентрации CO_2 и H_2O ;

2) содержание CO_2 увеличится на 1%, а содержание N_2 уменьшится на 1% при неизменной концентрации O_2 и H_2O .

Относительные объемные магнитные восприимчивости компонентов газовой смеси имеют следующие значения:

$$\chi_{O_2} = 1; \chi_{N_2} = 0,004; \chi_{CO_2} = -0,0057; \chi_{H_2O} = 0,004.$$

РЕШЕНИЕ.

$$\chi_{см} = \sum_{i=1}^n \chi_i C_i,$$

где C_i - объемная концентрация компонентов.

Следовательно, для исходной смеси газов

$$\chi_{см} = -0,15 \cdot 0,0057 + 0,04 \cdot 1 - 0,63 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = 0,03734.$$

Если содержание кислорода увеличится на 1%, а содержание азота уменьшится на 1%, то объемная магнитная восприимчивость

$$\chi'_{см} = -1,15 \cdot 0,0057 - 0,05 \cdot 1 - 0,62 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = 0,04738.$$

Таким образом, относительное изменение магнитной восприимчивости при изменении содержания O_2 на 1% составляет

$$\delta' = \frac{0,04738 - 0,03734}{0,03734} = 0,268, \text{ или } 26,8\%.$$

Если содержание CO_2 увеличится на 1%, а N_2 уменьшится на 1%, то магнитная восприимчивость

$$\chi'_{см} = -0,16 \cdot 0,0057 + 0,04 \cdot 1 - 0,62 \cdot 0,004 + 0,18 \cdot 0,004 = -0,03733.$$

Относительное изменение восприимчивости при изменении концентрации CO_2 на 1%

$$\delta'' = \frac{0,03733 - 0,03734}{0,03734} = -0,00027, \text{ или } -0,027\%.$$

Из примера видно, что изменение магнитной восприимчивости газовой смеси, вызванное изменением содержания углекислого газа, значительно меньше, чем вызванное изменением содержания кислорода.

Таким образом, можно считать, что магнитная восприимчивость дымовых газов определяется содержанием кислорода, в то время как влияние других компонентов мало.

ЗАДАЧА 42. Через магнитный газоанализатор проходит смесь следующего состава: CO_2 - 20%, O_2 - 5% и N_2 - 75% при расчетной температуре $t_1=20^\circ\text{C}$, разрежении $p_1=3$ кПа.

Изменится ли показание газоанализатора, если: 1) при неизменной концентрации температура смеси возрастет до $t_2=50^\circ\text{C}$; 2) при неизменной температуре возрастет разрежение до $p_2=10$ кПа? Предполагается, что на выходе из измерительной ячейки температура смеси равна $t_c=100^\circ\text{C}$.

РЕШЕНИЕ.

Показания газоанализатора определяются интенсивностью термомагнитной конвекции, которая в свою очередь определяется силой F_m , действующей на единичный объем смеси, нагретой до температуры T_2 и окруженной газовой смесью того же состава с температурой T_1

$$F_m = (\chi_1 - \chi_2) H \frac{dH}{dx},$$

где H - напряженность магнитного поля, градиент которого направлен вдоль оси x ;

χ_1 и χ_2 - объемная магнитная восприимчивость смеси при температурах T_1 и T_2 .

На основании уравнения зависимости χ от температуры можно получить следующее выражение

$$F_m = C_{\text{O}_2} \chi_0 T_0^2 \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \frac{p}{p_0} H \frac{dH}{dx},$$

где C_{O_2} - концентрация кислорода в смеси;

χ_0 - объемная восприимчивость кислорода при температуре $T_0=272$ К и давление $p_0=760$ мм рт.ст.;

p - давление газовой смеси.

Из формулы видно, что уменьшение p уменьшает значение F_m , а следовательно, и показания прибора. Если считать, что значения всех величин, кроме p , постоянны, то относительное изменение F_m при изменении p будет следующим:

$$\delta F_{\text{мр}} = \frac{p' - p}{p} 100\% = \frac{91,302 - 98,322}{98,322} 100 = -7,14\%,$$

где p' и p - текущее и градуировочное давление смеси.

Увеличение температуры смеси T на входе уменьшает интенсивность термомагнитной конвекции и приводит к уменьшению показаний. Относительное

уменьшение F_m при заданных условиях, если считать неизменными все остальные параметры, будет равно

$$\delta F_{M_i} = \frac{\frac{1}{T_2^2} - \frac{1}{T_1^2}}{\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_c^2}} 100\% = \frac{\frac{1}{323^2} - \frac{1}{293^2}}{\frac{1}{293^2} - \frac{1}{373^2}} 100 = -46,24\%.$$

Следует отметить, что изменение показаний прибора при изменении p и t смеси может быть иным, так как газовая конвекция в приборе осуществляется не только за счет силы F_m , но и за счет силы тепловой конвекции, которая в задаче не учитывалась. Кроме того, для уменьшения влияния p и t смеси на показания прибора применяются устройства для их стабилизации.

ЗАДАЧА 43. Рассмотрим вариант двухканальной схемы оптико-акустического газоанализатора. В этой схеме потоки лучистой энергии от источников инфракрасного излучения 1 проходят через фильтровые камеры 2 и затем поступают в измерительную 3 и сравнительную 4 камеры, а затем в лучеприемники 5 и 6. Определите зависимости между концентрацией анализируемого компонента в смеси и отношением потоков энергий, поступающих в лучеприемники 5 и 6.

РЕШЕНИЕ.

Поглощение лучистой энергии газом описывается законом Ламберта-Бера

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C l),$$

где $I_{0\lambda}$ - интенсивность монохроматического излучения с длиной волны λ , входящего в поглощающий слой газа;

I_λ - то же, но выходящего из поглощающего слоя газа;

ε_λ - коэффициент поглощения, характерный для данного газа и длины волны λ ;

C - концентрация анализируемого компонента в газовой смеси, поглощающего излучение длиной волны λ ;

l - толщина поглощающего слоя.

$$I_{\lambda 1} = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_1 l_1);$$

$$I_{\lambda 2} = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C_2 l_2),$$

где C_1 и C_2 - концентрация анализируемого компонента соответственно в сравнительной и измерительной камерах;

l_1 и l_2 - соответственно толщина газового слоя в сравнительной и измерительной камерах;

$I_{0\lambda}$ - интенсивность потоков излучения на входе в сравнительную и измерительную камеры.

Отсюда имеем

$$\frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}} = \frac{I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_{\lambda} C_1 l_1)}{I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_{\lambda} C_2 l_2)} = \exp \varepsilon_{\lambda} (C_2 l_2 - C_1 l_1)$$

или

$$\varepsilon_{\lambda} (C_2 l_2 - C_1 l_1) = \ln \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}}.$$

Таким образом, искомая зависимость имеет вид

$$C_2 = \frac{1}{l_2} \left(C_1 l_1 + \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \ln \frac{I_{\lambda 1}}{I_{\lambda 2}} \right).$$

ЗАДАЧА 44. Для условия задачи 43 определите, как изменятся показания газоанализатора, если печь для дожигания H_2 в газоанализаторе не работает, а в продуктах горения содержание 0,2 % H_2 и состав смеси будет следующий: $C_{CO_2} = 15\%$, $C_{O_2} = 4\%$, $C_{N_2} = 62,8\%$, $C_{H_2O} = 18\%$.

ЗАДАЧА 45. Как изменится абсолютная погрешность измерения O_2 твердоэлектродным газоанализатором, если температура газовой смеси увеличилась с $700^\circ C$ до $750^\circ C$ при неизменной концентрации $O_2 = 5\%$ об (эталонный газ-воздух)?

ЗАДАЧА 46. Насколько изменится направление разбаланса мостовой схемы термохимического газоанализатора при изменении концентрации CO в газовой смеси на 0,5% объема. Считать, что 1% оксида углерода на рабочем терморезисторе линейно увеличивает его температуру на $60^\circ C$; рабочий и эталонный терморезисторы – платиновые; напряжение питания моста – 1,6 В; сопротивление плеч при t_{20} одинаково и равно 10 Ом?

ЗАДАЧА 47. Чувствительный элемент датчика газоанализатора способен воспринять изменение концентрации ΔC . При каждом изменении концентрации на ΔC датчик получит объем информации $G = \log_2 N = 1$. Если за 1 сек концентрация может измениться на величину $C_1 - C_2$, то число подключений за это время составляет:

$$n = \frac{C_1 - C_2}{\Delta C}.$$

Определить, какого класса точности вторичный прибор надо взять для данного газоанализатора, если $n = 5$ и $G_n = 5$ бит.

РЕШЕНИЕ.

Желательно, чтобы коэффициент использования газоанализатора η был равен единице, т.е. чтобы

$$N \log_2 N = \frac{1}{\tau_m} \log_2 \left(1 + \frac{B}{2K}\right)$$

При времени успокоения стрелки вторичного прибора τ_m равном 1 сек, имеем:

$$5 = \log_2 \left(1 + \frac{B}{2K}\right)$$

Из этого равенства получаем:

$$32 = 1 + \frac{B}{2K} = 1 + \frac{100}{2K}$$

Отсюда класс точности измерительного прибора для газоанализатора $K=1,62$. Принимаем $K=1,5$, что дает необходимый для работы запас точности измерения.

ЗАДАЧА 48. Определите погрешность манометра с токовым выходным сигналом (0...5мА) с пределами измерения 0...4 МПа, если при измерении давления 3,2 МПа выходной сигнал составил $I = 3,39$ мА.

РЕШЕНИЕ:

Уравнение, связывающее токовый выходной сигнал манометра с входным сигналом имеет вид:

$$I = \frac{I_{\max}}{P_{\max}} P_{\text{вх}}.$$

Определим выходной сигнал, который должен быть при $P_{\text{вх}} = 3,2$ МПа:

$$I_g = \frac{5}{4} 3,2 = 4 \text{ мА}.$$

Определим абсолютную погрешность манометра по выходу:

$$\Delta I = I - I_g = 3,93 - 4 = -0,07 \text{ мА}.$$

ЗАДАЧА 49. Измерение давления осуществляется манометром с дифференциально - трансформаторной системой дистанционной передачи показаний (рисунок 6.4). Диапазон измерения прибора 0...16 МПа. Изменятся ли показания вторичного прибора, если при неизменном положении плунжера преобразователя манометра поменять фазу питания его обмотки возбуждения.

РЕШЕНИЕ:

Изменятся, стрелка сдвинется до отказа к нулевой отметке. При правильном включении сигналы преобразователя манометра и преобразователя вторичного прибора равны и включены в противофазе, так что

$$\Delta I_2 - \Delta I_1 = 0.$$

При изменении фазы питания преобразователя манометра на 180° ΔI_1 изменит знак на противоположный, поэтому на усилитель поступит сигнал

$$\Delta u = \Delta I_2 + \Delta I_1 \neq 0.$$

Следящая система будет стремиться уменьшить этот сигнал путем уменьшения ΔI_2 , что возможно при смещении стрелки к нулю. Однако при нулевом положении стрелки $\Delta I_2 = 0$, но $\Delta I_1 \neq 0$, поэтому указатель будет сдвинут до упора.

ЗАДАЧА 50. Определите погрешность манометра с пневматическим выходным сигналом (0,02...0,1 МПа) и пределом измерения 0...0,6 МПа, если при давлении 0,45 МПа значение выходного сигнала составило 0,084 МПа.

ЗАДАЧА 51. Какой из приборов милливольтметр или потенциометр целесообразно использовать совместно с термоэлектрическим преобразователем, если класс точности милливольтметра - 1,0, потенциометра – 0,25, но постоянная времени милливольтметра 1,0с, а потенциометра – 2,5с?

III. КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

Перечень вопросов, выносимых на зачет

1. Манометрические термометры.
2. Автоматические потенциометры типа РП-160.
3. Логометры. Принцип работы.
4. Уравновешенный мост автоматический типа КСМ
5. Уравновешенный мост автоматический типа РП-160
6. Потенциометрический метод измерения сопротивления
7. Термоэлектрические термометры. Принцип действия, типы.
8. Термометры сопротивления проводниковые.
9. Пирометры. Основы измерения температуры тела.
10. Яркостные пирометры
11. Радиационные пирометры
12. Цветовые пирометры
13. Термоэлектрические термометры. Правила трех проводников.
14. Оценка погрешностей при технических измерениях.
15. Магнитоэлектрический милливольтметр. Принцип действия.
16. Автоматические потенциометры типа КСГТ.
17. Неуравновешенный мост.
18. Двух- и трехпроводное подключение термометра сопротивления к мосту
19. Основные понятия о метрологических характеристиках средств измерения
20. Жидкостные термометры.
21. Цифровые омметры.
22. Интеллектуальные термопары
23. Интеллектуальные термометры сопротивления
24. Нормирующий преобразователь для термопары
25. Нормирующий преобразователь для термометра сопротивления
26. Понятия об измерениях средствами измерений.
27. Цифровые милливольтметры.
28. Полупроводниковые термосопротивления.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен

1. Видеографический регистратор.
2. Термокондуктометрические газоанализаторы.
3. Газоанализаторы. Система пробоподготовки.
4. Электромагнитные расходомеры
5. Измерение уровня в барабане котла. Схемы гидростатических уровнемеров.
6. Жидкостные приборы давления.
7. Оптоэлектронные газоанализаторы.
8. Радарные уровнемеры.

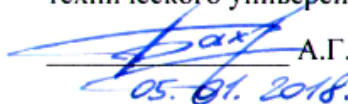
9. Системы передачи информации.
10. Основы теории передачи информации
11. Емкостные уровнемеры для проводящих жидкостей.
12. Емкостные уровнемеры для непроводящих жидкостей
13. Измерение-давления. Чувствительные элементы деформационных манометров.
14. Ультразвуковой расходомер. Фазовый метод измерения расхода.
15. Тензометрические приборы давления.
16. Оптоэлектронные газоанализаторы.
17. Ультразвуковой расходомер. Частотно-импульсный метод измерения расхода.
18. Уравнение расхода для несжимаемой жидкости.
19. Термомагнитный газоанализатор кислорода.
20. Вихревой расходомер с вихреакустическим преобразователем
21. Вихревой расходомер с пьезодатчиками
22. Буйковые уровнемеры.
23. Волноводный уровнемер
24. Емкостные приборы давления
25. Жидкостные приборы давления
26. Уравнение расхода среды для сжимаемой жидкости.
27. Приборы давления с упругими элементами. Основные понятия о чувствительных элементах.
28. Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве. Принцип действия.
29. Расходомеры типа Аннубар.
30. Газоанализатор электрохимический на твердом электролите.
31. Кориолисовый расходомер. Принцип действия.
32. Корреляционный расходомер
33. Термохимические газоанализаторы.

IV. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине «Контрольно-измерительные приборы и измерения»
Белорусский национальный технический университет**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Белорусского национального
технического университета

 А.Г. Баханович
05.01.2018.

Регистрационный № УД- ЭФЧ2-107 /уч.

**КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И
ИЗМЕРЕНИЯ**

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими
процессами»**

2017г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта ОСВО 1-53 01 04-2013.

СОСТАВИТЕЛИ:

В.И. Назаров, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент;
А.А. Павловская, старший преподаватель кафедры «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета.

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Ю.В.Бладыко, заведующий кафедрой «Электротехника и электроника» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент;

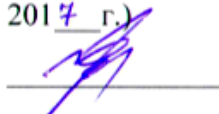
И.Е. Мигуцкий, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника» Белорусского национального технического университета, кандидат технических наук, доцент.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета

(протокол № 6 от 16.11. 2017 г.)

Заведующий кафедрой

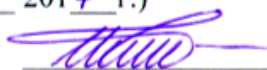


Н.Б. Карницкий

Методической комиссией энергетического факультета Белорусского национального технического университета

(протокол № 3 от 30.11. 2017 г.)

Председатель методической комиссии



И.Е. Мигуцкий

Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета (протокол № 11 секции №1 от 19.12. 2017г.)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Учебная программа «Контрольно-измерительные приборы и измерения» разработана для студентов высших учебных заведений специальности 1-53 01 04 «Автоматизация и управление теплоэнергетическими процессами» в соответствии с требованиями образовательного стандарта. Она предусматривает изучение теории и практики измерения температур, давлений, расхода, уровня жидкостей и состава газообразных сред – величин, характеризующих теплотехнические процессы.

Целью изучения учебной дисциплины является получение студентами знаний в области методов и технических средств измерений теплотехнических величин.

Основной задачей преподавания дисциплины является подготовка студентов к непосредственному изучению специальных курсов по специальности “Тепловые электрические станции”, а также к будущей практической деятельности.

Для успешного усвоения дисциплины необходимы знания по дисциплинам «Физика», «Химия», «Электротехника и электроника».

В результате освоения дисциплины “Контрольно-измерительные приборы и измерения” студент должен:

знать:

- принцип работы и устройства средств измерения температуры, давления уровня жидких сред, расхода газообразных и жидких сред и состава газов;

уметь:

- рассчитывать и выбирать основные средства измерения;
- проводить поверку средств измерений;

владеть:

- навыками расчета основных средств измерения в теплоэнергетике;
- перспективными методами и средствами измерения.

Освоение данной учебной дисциплины обеспечивает формирование следующих компетенций:

АК-1. Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;

АК-6. Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.

ПК-1. Осуществлять оперативный контроль за тепломеханическим режимом и состоянием основного и вспомогательного оборудования тепловых электростанций и систем теплоснабжения.

ПК-5. По результатам срабатывания устройств защиты и автоматики, показаниям контрольно-измерительной системы и состоянию оборудования выявлять причины отказов и аварий, разрабатывать и внедрять меры по их предупреждению.

Согласно учебному плану для очной формы получения высшего образования на изучение учебной дисциплины отведено всего 260 ч., из них аудиторных - 114 часов.

Распределение аудиторных часов по курсам, семестрам и видам занятий приведено в таблице 1.

Таблица 1.

Очная форма получения высшего образования					
Курс	Семестр	Лекции, ч.	Лабораторные занятия, ч.	Практические занятия, ч.	Форма текущей аттестации
2	4	36	18	0	зачет
3	5	36	36	18	экзамен

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
очная форма получения высшего образования

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	Общие сведения об измерениях, средствах измерений и погрешностях	4						
1.1	Измерения, средства измерения, измеряемые величины и погрешности	4						
II	Измерение температуры	14			12			
2.1	Жидкостные и термоэлектрические термометры	4			6			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
2.2	Манометрические термометры и термометры сопротивления	6			4			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
2.3	Измерение температуры бесконтактными методами	4			2			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
III	Вторичные приборы для измерения температуры	18			6			
3.1	Магнитоэлектрические и цифровые милливольтметры. Потенциометры. Нормирующие преобразователи	6			2			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
3.2	Мосты уравновешенные. Неуравновешенный мост. Логометры	6			2			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
3.3	Цифровые мосты. Потенциометрические аналоговые регистраторы	6			2			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
	Итого за семестр	36			18			зачет
	5 семестр							
IV	Измерение давления, разности давлений, расхода и уровня жидкостей	18	10		24			
4.1	Измерение давления и разности давлений	2	4		6			Отчет по лаб.раб. с устной защитой

4.2	Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры типа Анньюбар. Электромагнитные расходомеры. Вихревые расходомеры	6	2		6			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
4.3	Ультразвуковые расходомеры. Корреляционные расходомеры. Кориолисовый расходомер. Теплосчетчики	6	2		6			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
4.4	Измерение уровня жидкости	4	2		6			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
V	Средства измерения состава и качества газов	12	6		8			
5.1	Отбор пробы газа. Термомагнитные газоанализаторы. Термокондуктометрические газоанализаторы. Оптико-акустические газоанализаторы	6	4		4			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
5.2	Термохимические газоанализаторы. Электрохимические газоанализаторы. Оптико-электрические газоанализаторы	6	2		4			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
VI	Передача информации	6	2		4			
6.1	Передача информации средствами измерения	6	2		4			Отчет по лаб.раб. с устной защитой
	Итого за семестр	36	18		36			экзамен
	ИТОГО	72	18		54			
	Всего аудиторных часов	114						

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЯХ

Тема 1.1. Измерения, средства измерения, измеряемые величины и погрешности.

Понятие об измерениях. Прямые и косвенные измерения. Понятие о средствах измерений. Метрологические характеристики средств измерений. Погрешности измерения. Оценка погрешностей при технических измерениях.

Раздел II. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Тема 2.1. Жидкостные и термоэлектрические термометры

Общие понятия и определения. Температурная шкала. Жидкостные термометры. Принцип действия. Конструкция. Погрешность измерения. Область применения. Термоэлектрические термометры. Принцип действия. Основные типы термоэлектрических термометров. Термокомпенсационные провода. Схемы компенсации изменения температуры холодных спаев.

Тема 2.2. Манометрические термометры и термометры сопротивления

Манометрические термометры. Принцип действия. Конструкция. Погрешность измерения. Термосопротивления: платиновые, медные и полупроводниковые. Конструкция. Погрешность измерения. Область применения.

Тема 2.3. Измерение температуры бесконтактными методами

Основы измерения температуры тела по его тепловому излучению. Основные типы пирометров: радиационные, яркостные, цветовые. Принцип действия. Конструкция. Погрешность измерения.

Раздел III. ВТОРИЧНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Тема 3.1. Магнитоэлектрические и цифровые милливольтметры. Потенциометры. Нормирующие преобразователи

Аналоговые милливольтметры. Принцип действия. Конструкция. Схемы измерений. Погрешность измерения. Цифровые милливольтметры. Структурная схема. Погрешность измерения. Компенсационный метод измерения термо-эдс. Автоматический самопишущий потенциометр. Принципиальная электрическая схема. Нормирующий аналоговый преобразователь. Структурная схема измерения.

Тема 3.2. Мосты уравновешенные. Неуравновешенный мост.

Логометры

Мостовая схема измерения сопротивления. Автоматический уравновешенный мост. Принципиальная электрическая схема. Неуравновешенный мост. Принципиальная электрическая схема. Двух- трех проводная схема измерения термосопротивления. Логометры. Принцип действия. Схема измерения. Погрешность измерения.

Тема 3.3. Цифровые мосты. Потенциометрические аналоговые регистраторы

Цифровой мост. Структурная схема измерения. Потенциометрический аналоговый регистратор. Потенциометрический метод измерения термосопротивления. Структурная схема измерения.

Раздел IV. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ, РАСХОДА И УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

Тема 4.1. Измерение давления и разности давлений

Жидкостные приборы. Конструктивное исполнение. Деформационные манометры. Упругие чувствительные элементы. Тензометрические и емкостные приборы. Конструктивное исполнение. Дифференциальные манометры. Особенности конструкции.

Тема 4.2. Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры типа Анньюбар. Электромагнитные расходомеры. Вихревые расходомеры

Расходомеры переменного перепада давления на сужающем устройстве. Уравнения расхода для несжимаемой и сжимаемой среды. Правила установки, погрешность измерений. Измерение расхода среды по динамическому напору. Правила установки расходомеров типа Анньюбар. Погрешность измерений. Электромагнитные расходомеры с постоянным и переменным магнитным полем. Конструктивное исполнение. Погрешность измерений. Вихревые расходомеры. Принцип действия. Вихревые расходомеры с пьезометрическим и вихреакустическим преобразователем. Погрешность измерений.

Тема 4.3. Ультразвуковые расходомеры. Корреляционные расходомеры. Кориолисовый расходомер. Теплосчетчики

Ультразвуковые расходомеры. Принцип действия. Методы измерения: фазовый, фазо-частотный, времяимпульсный. Правила установки. Погрешность измерения. Корреляционные расходомеры. Принцип действия. Конструктивное исполнение. Погрешность измерений. Кориолисовые расходомеры. Принцип действия. Конструктивное исполнение. Теплосчетчики. Структурная схема. Погрешность измерений.

Тема 4.4. Измерение уровня жидкости

Измерения уровня воды в барабане котла. Гидростатические уровнемеры. Схема измерения. Буйковые уровнемеры. Конструкция, погрешность измерения. Емкостные уровнемеры для непроводящих и проводящих сред. Конструкция, погрешность измерений. Радарные и волноводные уровнемеры. Конструкция, погрешность измерений. Акустические и ультразвуковые уровнемеры. Схемы измерений. Погрешность измерений.

Раздел V. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА И КАЧЕСТВА ГАЗОВ

Тема 5.1. Отбор пробы газа. Термомагнитные газоанализаторы. Термокондуктометрические газоанализаторы. Оптико-акустические газоанализаторы

Устройство пробоподготовки. Схемы отбора пробы газа. Термомагнитные газоанализаторы. Принцип действия. Схема измерения. Термокондуктометрические газоанализаторы. Принцип действия. Схема измерения. Оптико-акустические газоанализаторы. Принцип действия. Конструкция датчика. Схема измерения.

Тема 5.2. Термохимические газоанализаторы. Электрохимические газоанализаторы. Оптико-электрические газоанализаторы

Термохимические газоанализаторы. Типы конструкций сенсора. Принцип действия. Схема измерения. Электрохимические газоанализаторы. Принцип действия. Конструкция сенсора на твердом электролите. Оптико-электронные газоанализаторы. Принцип действия. Схемы измерения с зондом и без зонда.

Раздел VI. ОСНОВЫ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Тема 6.1. Передача информации средствами измерения

Основы теории передачи информации. Системы дистанционной передачи информации: пневматическая, дифференциально-трансформаторная, токовая, цифровая. Современные направления в развитии методов и средств измерений.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Назаров, В.И. Теплотехнические измерения и приборы / В.И. Назаров. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 280 с.
2. Назаров, В.И. Теплотехнические измерения и приборы / В.И. Назаров, А.Л. Буров, В.А. Чиж.- Минск: Техноперспектива, 2008. – 174 с.

Дополнительная литература

1. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.

Средства диагностики результатов учебной деятельности

Оценка уровня знаний студента производится по десятибалльной шкале в соответствии с критериями, утвержденными Министерством образования Республики Беларусь.

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

- защита выполненных на лабораторных занятиях индивидуальных заданий;
- защита выполненных в рамках самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- сдача зачета;
- сдача экзамена.

Перечень тем практических занятий

8. Контактные методы измерения температуры: жидкостные термометры, манометрические термометры, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры.
9. Вторичные преобразователи термометров сопротивления и термоэлектрических термометров.
10. Бесконтактные методы измерения температуры.
11. Измерение давления среды.
12. Измерение уровня в барабане котла.
13. Методы измерения расхода среды.
14. Измерение состава газовых смесей.

Перечень тем лабораторных работ

13. Изучение принципа действия, конструкции и поверка термоэлектрических преобразователей.
14. Изучение принципа действия, конструкции и поверки термометров сопротивления.
15. Изучение принципа действия инфракрасного бесконтактного термометра.
16. Изучение принципа действия, устройства и поверки нормирующего преобразователя.
17. Устройство, принцип действия и поверка милливольтметров и логометров.
18. Определение динамических свойств датчиков температуры.
19. Устройство и принцип действия деформационных, тензометрических и грузопоршневых манометров. Поверка деформационного манометра.
20. Расходомеры переменного перепада давления. Определение коэффициента расхода сдвоенной диафрагмы.
21. Устройство и принцип действия электрохимических газоанализаторов на твердом электролите.
22. Изучение систем дистанционной передачи информации. Определение характеристики дифференциально-трансформаторной системы.
23. Изучение принципа действия преобразователя теплового потока.
24. Изучение принципа действия и конструкции влагомера твердых и сыпучих тел.

Перечень контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы студентов

1. В чем состоит принцип действия термопар?
2. Чем объясняется невысокий температурный предел хромель-копелевых термопар?
3. Чем определяется инерционность термопар?
4. Чему равна температура среды, если известно, что термо-ЭДС термопары типа ТПП составляет 3,749 мВ, а температура свободных концов 32 °С?
5. Что такое статическая характеристика термопары?
6. Что такое чувствительность термопары?
7. Термопару какой градуировки наиболее целесообразно применить для измерения температуры 800 °С?
8. Как подразделяются термопары по назначению?
9. Что такое градуировка термопары?
10. Каковы условия возникновения в термопаре термо-ЭДС?
11. Как проводится поверка термопар до 300 °С?
12. Чему равна температура холодного спая, если известно, что температура среды 800 °С, а поправка на температуру свободных концов 0,96 мВ (термопара типа ХА)?
13. Можно ли использовать одни и те же компенсационные провода для термоэлектрических термометров различных градуировок?

14. Каково назначение термоэлектродных (компенсационных) проводов?
15. Чем обусловлен выбор термоэлектродных (компенсационных) проводов?
16. Какие существуют способы поверки термопар?
17. Термоэлектрический термометр ТПП подсоединен к измерительному прибору медными проводами. Изменится ли термо-ЭДС, если взамен медных проводов подсоединение будет осуществляться алюминиевыми проводами? Значения температур концов термометра остались прежними.
18. Подключение термоэлектрического термометра к измерительному прибору осуществляется удлиняющими термоэлектрическими проводами. Обязательным ли является требование равенства температур мест соединения?
19. Будет ли изменяться термо-ЭДС термоэлектрического термометра типа ТХК при изменении температуры рабочего конца, но при сохранении разности температур рабочего и свободных концов, например $E(300, 50)$ и $E(600, 300)$?
20. Какая из термопар ТХА, ТХК и ТПП имеет наибольшую чувствительность?
21. Каким уравнением определяется полное сопротивление платинового термометра при температуре $t \geq 0$ °C?
22. От чего зависит класс точности термометра сопротивления?
23. По какой характеристике термометра сопротивления устанавливается градуировка?
24. Что такое критерий чистоты металла?
25. На чем основан принцип действия термометров сопротивления?
26. Назовите вторичные приборы термометров сопротивления.
27. Каким уравнением выражается зависимость сопротивления от температуры для медного термометра сопротивления?
28. В чем заключается методика поверки платиновых термометров сопротивления?
29. Какое сопротивление будет у медного термометра при 100 °C, если при $t=0$ °C $R_{20} = 1,75$ Ом?
30. От чего зависит инерционность термометра сопротивления?
31. Какими параметрами могут различаться термометры сопротивления различных классов, изготовленные из одного материала?
32. Какой из термометров сопротивления градуировки 100П или 100М имеет наибольший коэффициент преобразования при температуре 100 °C?
33. Одинаковы ли значения коэффициентов преобразования у медных термометров сопротивления градуировок 50М и 100М в интервале 0...150 °C?
34. Каково назначение нормирующего преобразователя?
35. Какие существуют унифицированные сигналы?
36. В чем преимущество унифицированного сигнала 4...20 мА по отношению к сигналу 0...20 мА?
37. По какому принципу реализуется измерительная схема нормирующего преобразователя?

38. Какие неунифицированные сигналы могут подаваться на вход нормирующего преобразователя?
39. Почему для поверяемого нормирующего преобразователя вариация равна нулю?
40. Какой первичный преобразователь подключается к поверяемому нормирующему преобразователю? Как определить градуировку первичного преобразователя?
41. В чем заключается принцип действия логометра?
42. Каковы основные отличия логометра от магнитоэлектрического милливольтметра?
43. Что относится к основным элементам измерительной схемы логометра?
44. Чем определяют угол поворота рамок логометра?
45. Что является источником тока, протекающего по рамкам логометра?
46. Почему рамки логометра включаются в мостовую схему?
47. Имеет ли место вариация для логометра?
48. Каким образом достигается в логометрах уравнивание подвижной системы?
49. За счет чего достигается равенство магнитоэлектрических моментов при повышении температуры среды?
50. 5.10. Как установить, для какого типа термометра отградуирован логометр?
51. В чем состоит принцип действия деформационных манометров?
52. Перечислить основные достоинства деформационных манометров.
53. Какие типы передающих механизмов применяются в показывающих деформационных манометрах?
54. Для измерения какого давления применяют манометр?
55. Почему деформационные манометры нуждаются в периодической поверке?
56. В чем состоит принцип действия грузопоршневых манометров?
57. Перечислить достоинства грузопоршневых механизмов.
58. Какой высоте водяного столба соответствует основная единица давления - паскаль?
59. Что такое предел пропорциональности трубчатой пружины?
60. Что определяет класс точности деформационного манометра?
61. Какие структуры используются для чувствительных элементов тензопреобразователей?
62. Что является основой в измерительной схеме чувствительного элемента тензопреобразователя?
63. Что входит в измерительный комплект расходомера переменного перепада давления?
64. От чего зависит коэффициент расхода диафрагмы и сопла Вентури?
65. Каковы условия применения расходомеров переменного давления?
66. За счет чего возникает потеря энергии потока в сужающем устройстве?
67. В чем отличие уравнений массового и объемного расходов среды?
68. В каком случае применяется сдвоенная диафрагма?
69. Что учитывает в уравнении расхода поправочный коэффициент E ?

70. Что положено в основу принципа действия дроссельных расходомеров?
71. Какие сужающие устройства используются в методе переменного перепада давления?
72. Какие системы отбора давления применяются в диафрагмах, соплах, соплах Вентури?
73. Почему диапазон измерения в методе переменного перепада давления составляет от $0,3 Q_{\max}$ до $1,0 Q_{\min}$?
74. На каком принципе измерения основан электрохимический метод, использующий твердый электролит?
75. Что собой представляет термодинамическое соотношение Нернста?
76. Из чего состоит твердоэлектролитный анод?
77. Что обычно является эталонными газами в электрохимической смеси?
78. Почему электрохимические газоанализаторы на твердом электролите наиболее эффективно применять для оптимизации процесса сжигания топлива?
79. Влияет ли изменение температуры в области сенсора на погрешность измерения концентрации CO?
80. Что такое кислородоионная проводимость и почему она возникает при высоких температурах?
81. Каково назначение дифференциально-трансформаторной системы передачи данных?
82. Назовите основные элементы дифференциально-трансформаторной системы передачи данных.
83. Какой унифицированный сигнал используется дифференциально-трансформаторной системой передачи данных?
84. Что является коэффициентом дифференциально-трансформаторной системы, включающей манометр типа МЭД, нормирующий преобразователь?
85. Какие типы электрических систем передачи распространены в энергетике?
86. Что такое статическая характеристика термопары?
87. Назовите основные показатели статической характеристики термопары.
88. Чем определяется динамическая характеристика термопар?
89. Какой вид имеет разгонная характеристика термопары?
90. К какому звену может быть отнесена термопара по своим динамическим свойствам?
91. Что такое постоянная времени термопары?
92. Что такое коэффициент передачи звена? Каков его физический смысл?
93. Как подразделяются по инерционности термопары?
94. Что такое тепловой поток и плотность теплового потока?
95. Для чего измеряют плотность теплового потока?
96. На чем основан метод измерения теплового потока?
97. В чем состоит принцип действия преобразователя теплового потока (ПТП)?
98. Что представляет собой батарея биметаллических элементов?
99. Для чего предназначен инфракрасный термометр?

100. На каком принципе основана работа инфракрасного термометра «Кельвин 201»?
101. Что такое излучательная способность тела?
102. Как определяется излучательная способность тела?
103. Каков порядок измерения температуры инфракрасным термометром «Кельвин 201»?
104. Для чего используется лазерный целеуказатель в инфракрасном термометре «Кельвин 201»?
105. Каковы причины, вызывающие дополнительные погрешности при измерении температуры инфракрасным термометром «Кельвин 201»?

Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

- решение индивидуальных задач;
- проработка вопросов, вынесенных на самостоятельное изучение.