

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.А. Силаев, Е.Ю. Силаева

Основы технических измерений

Электронное учебное пособие для ВУЗов



Волжский
2018

УДК 681.2(07)
ББК 34.9я73
С 36

Рецензенты:

канд. тех. наук доц. Волжский филиал МЭИ(ТУ)
Е.В. Капля,
канд. тех. наук доц. ВолгГТУ
А.М. Макаров

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Силаев, А.А.

Основы технических измерений [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. А. Силаев, Е. Ю. Силаева ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 597 КБ). – Волжский, 2018. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3000-0

В пособие рассмотрены основные понятия измерений, теория погрешностей. Большое внимание уделено средствам измерения электрических величин. Рассмотрены аналоговые и цифровые приборы. В отдельную часть вошел материал по первичным преобразователям неэлектрических величин в электрические.

Учебное пособие представляет собой конспект лекций.

Предназначено для студентов технических ВУЗов обучающихся по направлению бакалавриата «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения.

Ил. 14, табл. 4, библиограф.: 13 назв.

ISBN 978-5-9948-3000-0

© Волгоградский государственный
технический университет, 2018
© Волжский политехнический
институт, 2018

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение | 5 |
| 1 Основные понятия технических измерений | 6 |
| 1.1 Измерение. Характеристика измерений. Классификация измерений. | 6 |
| 1.2 Характеристики измерений | 7 |
| 1.3 Классификация измерений | 8 |
| 1.4 Обзор погрешностей измерений | 9 |
| 1.5 Примеры задач | 12 |
| 1.6 Порядок устранения случайной погрешности | 14 |
| 1.7 Методы обнаружения систематической погрешности | 17 |
| 2 Средства измерений. Классификация средств измерений. | 21 |
| 2.1 Средства измерения электрических величин | 23 |
| 2.2 Магнитоэлектрический измерительный прибор | 24 |
| 2.3 Электромагнитный измерительный прибор | 25 |
| 2.4 Электродинамический измерительный прибор | 27 |
| 2.5 Схемы включения измерительных приборов | 28 |
| 2.6 Схема включения амперметра | 28 |
| 2.7 Схема включения вольтметра | 29 |
| 2.8 Примеры решения задач с применением электромеханических приборов. | 30 |
| 2.9 Методическая погрешность измерения вольтметром | 31 |
| 2.10 Методическая погрешность измерения амперметром | 31 |
| 2.11 Измерительные мосты | 32 |
| 2.12 Цифровые приборы | 34 |
| 2.13 Цифровой вольтметр | 34 |
| 2.14 Время-импульсные преобразователи | 34 |
| 2.15 Преобразователи поразрядного кодирования | 36 |
| 3 Измерительные преобразователи | 38 |
| 3.1 Измерение температуры | 43 |
| 3.2 Термопара | 43 |
| 3.2.1 Различная зависимость средней энергии электронов от температуры в различных веществах | 45 |
| 3.2.2 Различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов | 46 |
| 3.3 Способы подключения. | 47 |
| 3.4 Применение термопар | 48 |
| 3.5 Типы термопар | 50 |
| 3.6 Термометр сопротивления | 51 |
| 3.7 Измерительные преобразователи давления | 52 |
| 3.7.1 Принципы реализации | 52 |
| 3.7.2 Тензометрический метод | 53 |
| 3.7.3 Пьезорезистивный метод | 53 |
| 3.7.4 Ёмкостной метод | 53 |
| 3.7.5 Резонансный метод | 54 |
| 3.7.6 Индуктивный метод | 54 |
| 3.7.7 Ионизационный метод | 54 |
| 3.7.8 Пьезоэлектрический метод | 55 |
| 3.8 Регистрация сигналов датчиков давления | 55 |
| 3.9 Измерительные преобразователи расхода | 56 |
| 3.10 Механические счётчики расхода | 56 |
| 3.10.1 Ёмкость и секундомер | 56 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.10.2 | Шестерёнчатые расходомеры | 56 |
| 3.10.3 | Расходомеры на базе объёмных гидромашин | 57 |
| 3.11 | Вентури-метры | 57 |
| 3.12 | Измерение расхода | 59 |
| 3.13 | Дисковая диафрагма | 60 |
| 3.14 | Трубка Пито | 60 |
| 3.15 | Оптические расходомеры | 61 |
| 3.16 | Расходомеры на основе двух лазерных лучей | 61 |
| 3.17 | Расчет сужающего устройства | 62 |
| 3.18 | Измерение уровня | 73 |
| | Заключение | 76 |
| | Список литературы | 77 |

Введение

Основы технических измерений – это предмет, в котором изучают общие принципы и методы измерений физических величин, основанные на конкретных физических явлениях и законах, а также изучают источники погрешностей измерений и методы повышения точности измерений.

Учебное пособие состоит из трех частей:

Первая часть включает в себя основные понятия измерений, теорию погрешностей и классификацию средств измерений.

Вторая часть посвящена средствам измерения электрических величин.

Третья часть посвящена измерению неэлектрических величин с помощью преобразователей.

В каждой части имеется набор практических задач с решением.

Данная структура учебного пособия позволит студентам в начале изучить теорию измерений. Потом познакомиться с самыми распространёнными видами измерений – с электрическими. Изучить принцип действия средств измерения электрических величин. И в конце познакомиться с методами измерения неэлектрических величин с помощью различных преобразователей.

Учебное пособие предназначено для студентов технических ВУЗов обучающихся по направлению бакалавриата «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения.

1 Основные понятия технических измерений

1.1 Измерение. Характеристика измерений. Классификация измерений.

Дадим основные определения понятия, применяемые в изучаемом курсе.

Измерение – это организованное действие человека, выполняемое для количественного познания свойств физического объекта с помощью определения опытным путем значения какой-либо физической величины (измеряемой величины).

Основное уравнение измерения:

$$X = n[x],$$

где X – измеряемая величина, $[x]$ – единица величины, n – число.

Измеряемая физическая величина – физическая величина, подлежащая измерению в соответствии с поставленной измерительной задачей.

Влияющая физическая величина – физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или на объект измерения таким образом, что это приводит к искажению результата измерения.

Различают истинное и действительное значения измеряемой величины.

Истинное значение физической величины – это значение, которое идеальным образом отображало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

Действительное значение физической величины – это значение, найденное экспериментально и настолько приближенное к истинному значению, что для конкретной цели может быть использовано вместо него.

1.2 Характеристики измерений

К основным характеристикам измерений можно отнести следующие понятия.

Принцип измерений – физическое явление или совокупность физических явлений, положенных в основу измерений. (Например, изменение сопротивления материалов от температуры, возникновение ЭДС в проводнике в движущемся магнитном поле).

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Например, метод сравнения с мерой применяется на рычажковых весах.

Средствами измерений – являются используемые технические средства, имеющие нормированные метрологические свойства, предназначенные для измерения одной и той же физической величины. Например, амперметр, вольтметр.

Правильность измерения – это характеристика измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов.

Достоверность измерений – характеризует доверие к результатам измерений и делит их на две категории: достоверные и недостоверные, в зависимости от того, известны или неизвестны вероятностные характеристики их отклонений от истинных значений соответствующих величин.

Воспроизводимость измерений характеризует близость к нулю случайной погрешности при повторных измерениях одной и той же величины в одинаковых условиях одним и тем же методом.

Сходимость измерений – характеризует близость друг к другу результатов измерений, выполненных в различных условиях, различными методами, на различных типах приборов.

1.3 Классификация измерений

Рассмотрим обобщённую классификацию измерений.

По способу получения результатов измерений измерения разделяют на:

Прямые – это измерения, при которых значение физической величины находят непосредственно из опытных данных.

При прямых измерениях измеряемую величину сравнивают непосредственно с мерой или же находят с помощью измерительных приборов. Например, измерение силы тока с помощью амперметра.

Косвенные – это измерения, при которых неизвестную величину определяют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямым измерениям, т.е. измеряют не собственно определяемую величину, а другие, функционально с ней связанные. Например, определение сопротивления участка электрической цепи с помощью измеренных значений силы тока и напряжения.

Совокупные – это производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых неизвестную величину определяют решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Например, определение номинальных масс отдельных гирь по образцовой массе какой-либо гири.

Совместные – это производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимостей между ними. Например, определение коэффициентов, связывающих зависимость сопротивления полупроводниковых материалов от температуры.

По условиям, определяющим точность результатов измерений, измерения делятся на три класса:

Измерения максимальной возможной точности (эталонные), достижимой при существующем уровне техники.

Контрольно-поверочные измерения, погрешность которых с определенной вероятностью не должна превышать некоторого заданного значения.

Технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

По типу измеряемой величины различают множество групп измерений. Перечислим лишь некоторые из них:

Электрические – измерения производятся с помощью различных средств – измерительных приборов, схем и специальных устройств.

Физико-химические – это все измерения, связанные с контролем состава веществ, материалов и изделий.

Магнитные – измерения характеристик магнитного поля или магнитных свойств веществ.

1.4 Обзор погрешностей измерений

Для начала дадим определение погрешности измерений.

Погрешность измерений – разность между полученным при измерении X и истинным Q значениями измеряемой величины.

В качестве обзора погрешностей измерений приведем классификацию измерений.

По способу выражения погрешности делятся:

Абсолютная погрешность – разность между полученным при измерении значением величины и ее истинным (или действительным) значением. Абсолютная погрешность выражается в тех же единицах измерения, что и измеряемая величина. Зная только абсолютную погрешность измерений нельзя судить о качестве – точности проведенного измерения.

Относительная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная отношением модуля абсолютной погрешности измерения к истинному (или действительному) значению измеряемой величины;

$$\delta = \frac{|X - Q|}{Q} \cdot 100\% .$$

Относительная погрешность выражается в процентах или в безразмерных единицах. Значение относительной погрешности позволяет судить о точности проведённого измерения.

Приведённая погрешность – это относительная погрешность, в которой абсолютная погрешность средства измерения отнесена к условно принятому нормирующему значению, постоянному во всем диапазоне измерений или его части.

$$\gamma = \frac{|\Delta \max|}{X_n} \cdot 100\% ,$$

где X_n – нормирующее значение. В качестве нормирующего значения используют предел измерения средства измерения.

По зависимости погрешности от значений измеряемой величины погрешности бывают:

Аддитивная погрешность – это погрешность, не зависящая от измеряемой величины (рисунок 1.а);

Мультипликативная погрешность – это погрешность, которая прямо пропорциональна измеряемой величине (рисунок 1.б);

Нелинейная погрешность – это погрешность, которая имеет нелинейную зависимость от измеряемой величины (рисунок 1.в).

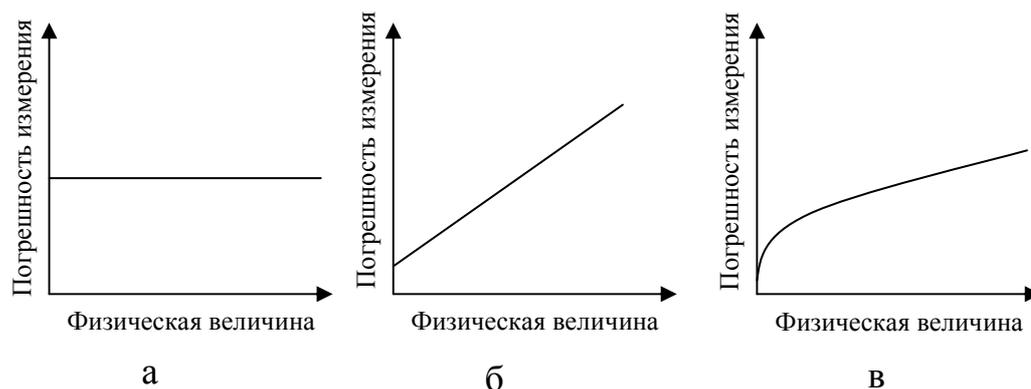


Рисунок 1. Зависимость погрешности от измерения величины.

По характеру проявления погрешности делятся:

Случайная погрешность – это составляющая погрешности измерения, связанная с факторами, которые изменяются при повторных измерениях хаотически, носят нерегулярный характер и их трудно предвидеть. Иногда подобные изменения проявляются очень сильно, например, при резком однократном изменении напряжения питания прибора. В этом случае погрешность значительно превышает границы, определяемые ходом процесса измерений в целом, и ее называют грубой погрешностью или промахом.

Систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно меняющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. При этом систематические погрешности представляют собой определенную функцию неслучайных факторов, состав которых зависит от физических, конструкционных и технологических особенностей средств измерений, условий их применения, а также индивидуальных качеств наблюдателя.

В зависимости от причин возникновения рассматриваются четыре вида систематических погрешностей:

— **Погрешности метода**, или теоретические погрешности, возникающие от ошибочности или недостаточной разработки принятой

теории метода измерений в целом или от допущенных упрощений при проведении измерений;

— **Инструментальные погрешности**, возникают из-за собственной погрешности средства измерения, определяемой классом точности, влиянием средства измерения на результат и его ограниченной разрешающей способностью;

— **Погрешности, обусловленные неправильной установкой и взаимным расположением средств измерения**, являющихся частью единого комплекса, несогласованностью их характеристик, влиянием внешних температурных, гравитационных, радиационных и других полей, нестабильностью источников питания, несогласованностью входных и выходных параметров электрических цепей приборов и так далее;

— **Личные погрешности**, связаны с индивидуальными особенностями наблюдателя.

1.5 Примеры задач

Рассмотрим примеры задач связанных с обзором погрешностей измерений.

Задача 1. Для вольтметра с пределом измерения на 500 В с классом точности 1,5 определить максимальную абсолютную погрешность. Сравнить точность измерения этим вольтметром на напряжение 100 вольт и 500 вольт.

Решение задачи.

Класс точности прибора это его приведённая погрешность. Следовательно, максимальная абсолютная погрешность выражается из

формулы $\gamma = \frac{|\Delta_{\max}|}{X_n} \cdot 100\%$. $\Delta_{\max} = \frac{X_n \cdot \gamma}{100\%} = \frac{500B \cdot 1.5\%}{100\%} = 7.5B$.

Для того чтобы оценить точность измерений необходимо найти относительную погрешность для указанных напряжений, при условии, что абсолютную погрешность мы нашли предыдущим действием:

$$\delta_{100} = \frac{|\Delta_{\max}|}{Q_{100}} \cdot 100\% = \frac{7.5B}{100B} \cdot 100\% = 7.5\% .$$

$$\delta_{500} = \frac{|\Delta_{\max}|}{Q_{500}} \cdot 100\% = \frac{7.5B}{500B} \cdot 100\% = 1.5\% .$$

Таким образом, при 500 измерении 500 вольт точность получается больше.

Задача 2. Определить соответствует ли амперметр с пределом измерения на 5Ампер с классом точности 1,5 своему классу точности. Если при проведении его поверки образцовым амперметром были получены следующие показания:

| | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| I, A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| I ₀ , A | 1,05 | 1,94 | 3,05 | 3,96 | 5,06 |

Решение задачи.

Для того чтобы определить соответствует ли амперметр своему классу точности необходимо определить приведённую погрешность прибора и если она меньше класса точности прибора, то прибор соответствует своему классу точности.

Абсолютная погрешность — это разность между показаниями испытуемого прибора и образцового. Из таблицы видно, что максимальная абсолютная погрешность будет равна $\Delta_{\max} = 0.06A$.

Тогда приведённая погрешность будет находиться следующим образом:

$$\gamma = \frac{|\Delta \max|}{X_n} \cdot 100\% = \frac{|0,06|}{5} \cdot 100\% = 1,2\%.$$

Таким образом, приведённая погрешность меньше класса точности прибора, а значит, прибор соответствует своему классу точности.

Задача 3. Определить какой из двух приборов измеряет ток 200мкА точнее РА1 = класс точности 0,2 предел 300мкА.

РА2 = класс точности 0,1 предел 1мА.

Решение задачи.

Необходимо для каждого прибора рассчитать относительную погрешность для измерения указанного в условии тока. Для этого необходимо рассчитать максимальную абсолютную погрешность для каждого из приборов через формулу для приведённой погрешности.

$$\gamma = \frac{|\Delta \max|}{X_n} \cdot 100\%.$$

$$\Delta \max_1 = \frac{X_{1n} \cdot \gamma_1}{100\%} = \frac{300 \text{ мкА} \cdot 0,2\%}{100\%} = 0,6 \text{ мкА}.$$

$$\Delta \max_2 = \frac{X_{2n} \cdot \gamma_2}{100\%} = \frac{1000 \text{ мкА} \cdot 0,1\%}{100\%} = 1 \text{ мкА}.$$

Далее найдёт для каждого прибора относительную погрешность:

$$\delta_1 = \frac{|\Delta \max_1|}{Q} \cdot 100\% = \frac{0,6 \text{ мкА}}{200 \text{ мкА}} \cdot 100\% = 0,3\%.$$

$$\delta_2 = \frac{|\Delta \max_2|}{Q} \cdot 100\% = \frac{1 \text{ мкА}}{200 \text{ мкА}} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Таким образом, первый прибор измеряет точнее.

1.6 Порядок устранения случайной погрешности

Одним из способов устранения случайной погрешности измерений является проведения многократных измерений одной и той же величины. Рассмотрим порядок устранения случайной погрешности.

1. Выполняется n многократных повторяющихся измерений физической величины.

2. Вычисляется среднее арифметическое значений из n измерений:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

3. Определяется среднеквадратичная погрешность среднего арифметического:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\langle x \rangle - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$$

4. Задается доверительная вероятность α и определяется коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}$ для заданного α и числа произведенных измерений n , по таблице 1.

5. Находится полуширина доверительного интервала (абсолютная погрешность результата измерений):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сист}}^2 + \Delta x_{\text{сл}}^2}, \text{ где } \Delta x_{\text{сл}} = t_{\alpha,n} \cdot S$$

где $\Delta x_{\text{сист}}$ – систематическая погрешность прибора равна половине цены деления младшего разряда шкалы.

6. Оценивается относительная погрешность результата измерений

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle}$$

7. Окончательный результат записывается в виде

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x$$

Для решения задач по нахождения случайной погрешности необходим коэффициент Стьюдента:

Таблица 1 Коэффициент Стьюдента

| $\alpha = 0,68$ | | $\alpha = 0,95$ | | $\alpha = 0,99$ | |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| n | $t_{\alpha,n}$ | n | $t_{\alpha,n}$ | n | $t_{\alpha,n}$ |
| 2 | 2,0 | 2 | 12,7 | 2 | 63,7 |
| 3 | 1,3 | 3 | 4,3 | 3 | 9,9 |
| 4 | 1,3 | 4 | 3,2 | 4 | 5,8 |
| 5 | 1,2 | 5 | 2,8 | 5 | 4,6 |
| 6 | 1,2 | 6 | 2,6 | 6 | 4,0 |

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 7 | 1,1 | 7 | 2,4 | 7 | 3,7 |
| 8 | 1,1 | 8 | 2,4 | 8 | 3,5 |
| 9 | 1,1 | 9 | 2,3 | 9 | 3,4 |
| 10 | 1,1 | 10 | 2,3 | 10 | 3,3 |
| 15 | 1,1 | 15 | 2,1 | 15 | 3,0 |
| 20 | 1,1 | 20 | 2,1 | 20 | 2,9 |
| 30 | 1,1 | 30 | 2,0 | 30 | 2,8 |
| 100 | 1,0 | 100 | 2,0 | 100 | 2,6 |

Рассмотрим пример решения задачи на устранение случайной погрешности:

Амперметром с ценой деления 0.1 мкА проводится 10 измерений, приведённых в таблице. Оценить погрешность измерений. Доверительная вероятность $\alpha=0,95$ Коэффициент Стьюдента 2.3.

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|------|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|
| Число измерений | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Значения измеряемой величины, мкА | 10 | 10,5 | 9,8 | 9,7 | 10,4 | 10,1 | 9,6 | 10,2 | 10,5 | 10,2 |

Переходим к вычислению среднего арифметического значения измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum 10 + 10,5 + 9,8 + 9,7 + 10,4 + 10,1 + 9,6 + 10,2 + 10,5 + 10,2 = 10,1$$

Вычислим среднеквадратичную погрешность среднего арифметического:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\langle x \rangle - x_i)^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\sum \frac{(10,1-10)^2 + (10,1-10,5)^2 + (10,1-9,8)^2 + (10,1-9,7)^2 + (10,1-10,4)^2}{10 \cdot (10-1)}} + \sqrt{\frac{(10,1-10,1)^2 + (10,1-9,6)^2 + (10,1-10,2)^2 + (10,1-10,5)^2 + (10,1-10,2)^2}{10 \cdot (10-1)}} = 0,102$$

Зададим доверительную вероятность $\alpha=0,95$ и определим коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,n}=2,3$ для заданного α и числа произведенных измерений n , по таблице 1.

Найдём полуширину доверительного интервала (абсолютная погрешность результата измерений):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сум}}^2 + \Delta x_{\text{сл}}^2} = \sqrt{(0,05)^2 + (2,3 \cdot 0,102)^2} = 0,24 \text{ мкА}$$

Оценим относительную погрешность результата измерений

$$\delta = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} = \frac{|0,24|}{10,1} \cdot 100\% = 2,4\%$$

Окончательный результат запишем в виде

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x = 10,1 \pm 0,24 \text{ мкА}.$$

1.7 Методы обнаружения систематической погрешности

Существуют универсальные методы обнаружения и устранения систематических погрешностей. Рассмотрим некоторые методы из них.

Метод противопоставления – измерение выполняется дважды и проводится так, чтобы в обоих случаях причина постоянной погрешности оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений.

Например, измерить сопротивление с помощью одинарного моста методом противопоставления.

Сначала измеряемое сопротивление R_x уравнивают известным сопротивлением R_1 , включённым в плечо сравнения моста. При этом:

$$R_x = \frac{R_1 * R_3}{R_4}, \text{ где } R_3, R_4 \text{ – сопротивление плеч моста. Затем резисторы } R_x \text{ и } R_1$$

меняют местами и вновь уравнивают мост, регулируя сопротивление

резистора R_1 . В этом случае: $R_x = \frac{R_1' * R_3}{R_4}$. Тогда измеряемое сопротивление

находится по формуле: $R_x = \sqrt{R_1 * R_1'}$.

Метод компенсации погрешности по знаку предусматривает измерение с двумя измерениями, выполняемыми так, чтобы постоянная систематическая погрешность входила в результат каждого из них с разными знаками. Результат измерения получим как полусумму двух

$$\text{результатов измерений } X_1 = X_x + \Delta X, X_2 = X_k - \Delta X \cdot X_x = \frac{X_1 + X_2}{2}.$$

Для устранения переменных и монотонно изменяющихся систематических погрешностей применяют следующие методы.

Метод симметрических наблюдений. Рассмотрим сущность этого метода на примере измерительного преобразователя, передаточная функция которого имеет вид $y=kx+y_0$, где x , y – входная и выходная величины преобразователя; k – коэффициент, погрешность которого изменяется во времени по линейному закону; y_0 – постоянная. Для устранения систематической погрешности трижды измеряется выходная величина y через равные промежутки времени Δt . При первом и третьем измерениях на вход преобразователя подаётся сигнал x_0 от образцовой меры. В результате измерений получается система уравнений:

$$\begin{aligned} y_1 &= kx + y_0 \\ y_2 &= (k \pm \frac{dk}{dt} \Delta t)x + y_0 \\ y_3 &= (k \pm 2 \frac{dk}{dt} \Delta t)x_0 + y_0 \end{aligned}$$

Её решение позволяет получить значение x , свободное от переменной систематической погрешности, обусловленной изменением коэффициента k .

Метод последовательных разностей – применяется для обнаружения изменяющихся во времени систематической погрешности и состоит в следующем. Дисперсию результатов наблюдения можно оценить

двумя способами: обычным $\sigma^2[x] = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2$.

И вычислением суммы квадратов последовательных (в порядке проведения измерений) разностей $(x_{i-1} - x_i)^2$: $Q^2[x] = \frac{1}{n-1(n-1)} \sum_{i=2}^n (x_{i-1} - x_i)^2$.

Если в процессе измерений происходило смещение центра группирование результатов наблюдений, т.е. имела место переменная систематическая погрешность, то $\sigma^2[x]$ даёт преувеличенную оценку

дисперсии результатов наблюдений. Отношение $v = \frac{Q^2[x]}{\sigma^2[x]}$ является критерием для обнаружения систематических смещений центра группированием результатов наблюдений. Если полученное значение критерия меньше v_q при заданных q и n (см. таблицу 2), то гипотеза о постоянстве центра группирования результатов наблюдений отвергается, т.е. обнаруживается переменная систематическая погрешность результатов измерений. Где n – число измерений, q – доверительная вероятность.

Таблица 2 Значения критерия Аббе.

| n | V _q при q равном | | | n | V _q при q равном | | |
|----|-----------------------------|-------|-------|----|-----------------------------|-------|-------|
| | 0.001 | 0.01 | 0.05 | | 0.001 | 0.01 | 0.05 |
| 4 | 0.295 | 0.313 | 0.390 | 13 | 0.295 | 0.431 | 0.578 |
| 5 | 0.208 | 0.269 | 0.410 | 14 | 0.311 | 0.447 | 0.591 |
| 6 | 0.182 | 0.281 | 0.445 | 15 | 0.327 | 0.461 | 0.603 |
| 7 | 0.185 | 0.307 | 0.468 | 16 | 0.341 | 0.474 | 0.614 |
| 8 | 0.202 | 0.331 | 0.491 | 17 | 0.355 | 0.487 | 0.624 |
| 9 | 0.221 | 0.354 | 0.512 | 18 | 0.368 | 0.499 | 0.633 |
| 10 | 0.241 | 0.376 | 0.531 | 19 | 0.381 | 0.510 | 0.642 |
| 11 | 0.260 | 0.396 | 0.548 | 20 | 0.393 | 0.520 | 0.650 |
| 12 | 0.278 | 0.414 | 0.564 | | | | |

Рассмотрим пример применения метода последовательных разностей для обнаружения изменяющейся во времени систематической погрешности. Используя метод последовательных разностей, определить, присутствует ли систематическая погрешность в ряду результатов наблюдений.

Таблица 3 Результаты наблюдений

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| x _i | 13.4 | 13.3 | 14.5 | 13.8 | 14.5 | 14.6 | 14.1 | 14.3 | 14.0 | 14.3 |

1. Вычислим среднее арифметическое измеряемой величины:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum 13.4 + 13.3 + 14.5 + 13.8 + 14.5 + 14.6 + 14.1 + 14.3 + 14.0 + 14.3 = 14.08$$

2. Вычислим дисперсию:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\langle x \rangle - x_i)^2}{n \cdot (n-1)} = \sum \frac{(13.4-14.08)^2 + (13.3-14.08)^2 + (14.5-14.08)^2 + (13.8-14.08)^2 + (14.5-14.08)^2}{10 \cdot (10-1)} + \frac{(14.6-14.08)^2 + (14.1-14.08)^2 + (14.3-14.08)^2 + (14-14.08)^2 + (14.3-14.08)^2}{10 \cdot (10-1)} = 0,021$$

3. Вычислим сумму квадратов последовательных разностей

$$Q^2 = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(x_i - x_{i+1})^2}{(n-1) \cdot (n-1)} = \sum \frac{(13.4-13.3)^2 + (13.3-14.5)^2 + (14.5-13.8)^2 + (13.8-14.5)^2 + (14.5-14.6)^2}{9 \cdot (10-1)} + \frac{(14.6-14.1)^2 + (14.1-14.3)^2 + (14.3-14)^2 + (14-14.3)^2}{9 \cdot (10-1)} = 0,036$$

4. Вычислим отношение $v = \frac{Q^2[x]}{\sigma^2[x]} = \frac{0,021}{0,036} = 0,58$.

5. Определим табличное значение критерия Аббе для $n=10$ и $q=0.05$

$V_q=0.531$. Так как отношение $v = \frac{Q^2[x]}{\sigma^2[x]}$ меньше табличного значения,

значит систематическая погрешность отсутствует.

2 Средства измерений. Классификация средств измерений.

Средство измерения – это техническое устройство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Рассмотрим классификацию средств измерений:

По функциональному назначению все средства измерения делятся на:

Мера – средство измерения, предназначенное для воспроизведения и хранения физической величины заданного размера. Наряду с простейшими мерами, такими, как меры массы (гири) или меры вместимости (мерные стаканы, цилиндры), к мерам относятся и более сложные устройства, например нормальные элементы (меры электродвижущей силы), катушки электрического сопротивления, светоизмерительные лампы.

Измерительный прибор – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации (т.е. сигнала, содержащего количественную информацию об измеряемой физической величине) в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В аналоговых Измерительных приборах считывание измерительной информации производится по шкале, в цифровых – по цифровому отсчётному устройству.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, обработки и хранения, но не обеспечивающей непосредственное восприятия наблюдателем. Наиболее многочисленной группой средств измерений являются измерительные

приборы и преобразователи, которые обобщенно называют измерительными устройствами.

Измерительный преобразователь является основой для построения более сложных средств измерений, измерительных приборов, информационно-измерительных систем.

В зависимости от положения преобразователя в измерительной цепи различают:

Первичный преобразователь непосредственно взаимодействует с объектом измерения. При измерениях неэлектрических величин первичный измерительный преобразователь называется датчиком.

Промежуточный преобразователь располагается в измерительной цепи и непосредственно не взаимодействует с объектом измерения.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных средств измерений, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте.

Измерительная система – совокупность технических средств в блочно-модульном исполнении, объединённых общим алгоритмом функционирования, обладающая нормированными метрологическими характеристиками и предназначенная для получения измерительной информации непосредственно от объекта, её преобразования, передачи, хранения, обработки и выдачи в виде, удобном для восприятия оператором или ввода в систему автоматического управления.

По точности измерений измерительные средства можно разделить на: эталоны, образцовые и рабочие средства измерений.

Эталонное средство измерения – это средство измерений, обеспечивающее воспроизводство и (или) хранение единицы физической величины с максимальной точностью с целью передачи ее размера

образцовым средствам измерений. Эталоны в свою очередь делятся на: первичные, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны.

Образцовое средство измерений – средство измерения, служащие для поверки по ним рабочих средств измерений. В зависимости от уровня точности образцовые средства измерений делятся на разряды.

Рабочее средство измерений – средство, применяемое для технических измерений, не связанных с передачей размера единицы физической величины.

По способу обработки сигнала измерительной информации приборы делятся на аналоговые и цифровые.

В аналоговых средствах измерения показания являются непрерывной функцией размера измеряемой величины, т.е. могут, как и измеряемая величина, принимать бесконечное множество значений.

В цифровых средствах измерения непрерывная измеряемая величина дискретизируется по времени, квантуется по уровню, кодируется и в виде цифрового кода отображается на цифровом отсчете устройстве. В результате показания цифрового прибора могут принимать лишь конечное число значений

2.1 Средства измерения электрических величин

Электромеханические измерительные приборы. Принцип действия.

Одними из самых распространённых измерительных аналоговых приборов являются электромеханические измерительные приборы, к которым относятся: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и индукционные измерительные приборы. Рассмотрим более их подробно.

2.2 Магнитоэлектрический измерительный прибор

Принцип действия магнитоэлектрического измерительного прибора основан на действии постоянного магнита на проводник с током, помещённый в магнитное поле этого магнита.

В магнитоэлектрическом приборе (рисунок 2) подвижная катушка установлена на опорах и может поворачиваться в зазоре магнитной цепи в составе магнитопровода 2 полюсного наконечника 3 и цилиндрического сердечника 4, изготовляемых из магнитно-мягкого материала, и постоянного магнита 1.

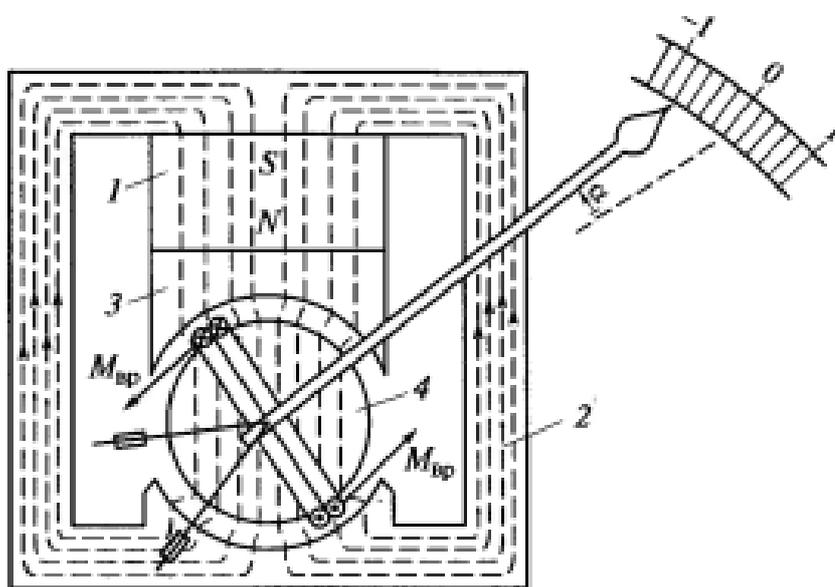


Рисунок 2 Магнитоэлектрический измерительный прибор.

На подвижную часть механизма действует вращающий момент

$$M_{вр} = \frac{2Fwd}{2} = wlBI d = k_{вр} I$$

где: d и l – диаметр и длина каркаса катушки, содержащей w витков;

$F=BI$ – сила Ампера, действующая на каждый проводник катушки;

$k_{вр}=wldB$ – коэффициент пропорциональности вращающего момента.

Противодействующий момент спиральной пружины (на рисунке 2 не показана) пропорционален углу поворота катушки α , т.е. $M_{пр} = k_{пр}\alpha$, где $k_{пр}$ – коэффициент пропорциональности.

При равенстве моментов $M_{вр} = M_{пр}$ угол поворота катушки пропорционален измеряемому току:

$$I = \frac{k_{пр}}{k_{вр}} = C1\alpha$$

где: $C1$ – постоянная прибора («цена деления шкалы»).

Основные достоинства показывающих приборов магнитоэлектрической системы – высокие чувствительность и класс точности (до 0,1) и равномерность шкалы при измерении в цепи постоянного тока вследствие значительной и равномерно распределенной в воздушном зазоре магнитной цепи измерительного механизма магнитной индукции поля.

Основные недостатки – измерение только постоянных токов, высокая чувствительность к перегрузкам по току.

2.3 Электромагнитный измерительный прибор

Принцип действия электромагнитных измерительных приборов (рисунок 3) основан на действии переменного магнитного поля неподвижной катушки 1 с током на сердечнике 2 из магнито-мягкого материала, находящегося в этом поле. Сердечник 2, эксцентрично закреплённый на оси 3, намагничивается и втягивается в щель катушки. Сила, действующая на сердечник, создаёт вращающий момент $M_{вр}$. Противодействующий момент $M_{пр} = k \cdot \alpha$ обеспечивается спиральной пружиной 4. При равенстве вращающегося и противодействующего моментов угол отклонения α стрелки 5 пропорционален току I^2 в катушке 1. Для ослабления колебаний стрелки механизм имеет воздушный успокоитель 6.

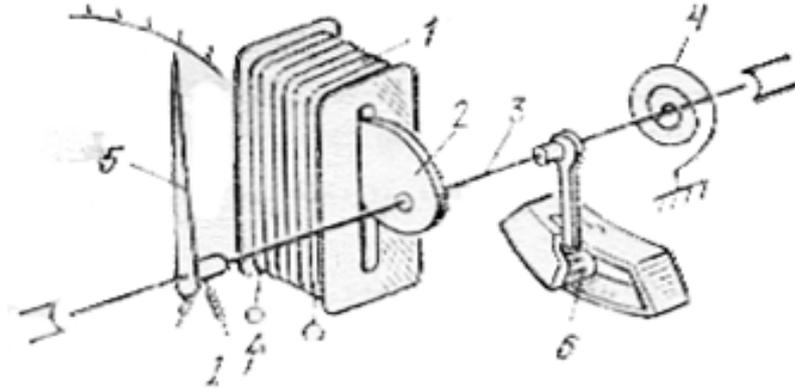


Рисунок 3. Электромагнитный измерительный прибор.

Вращающийся момент электромагнитного измерительного механизма

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{м}}}{d\alpha} = \frac{d(LI^2/2)}{d\alpha} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha}$$

где: $W_{\text{м}}$ – энергия магнитного поля катушки;

L – индуктивность.

При равенстве вращающегося и противодействующего моментов:

$$(I^2/2)dL/d\alpha = k*\alpha,$$

определяется функциональная зависимость угла отклонения от значения тока:

$$\alpha = \frac{I^2}{2k} \frac{dL}{d\alpha}$$

Из формулы видно, что шкала прибора с электромагнитным измерительным механизмом нелинейная. Подбором формы сердечника 2 добиваются того, чтобы изменение производной $dL/d\alpha$ по возможности компенсировало нелинейность зависимости угла от тока. В реальных измерительных приборах начальный нелинейный участок составляет 20-25% всей шкалы и часто не градуируется. Это уменьшает чувствительность механизма.

К достоинствам электромагнитного механизма следует отнести: простоту конструкции, способность выдерживать большие перегрузки, что объясняется отсутствием токоподводов к подвижной части, пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного токов без дополнительных преобразователей.

Основные недостатки: малая точность и чувствительность прибора.

2.4 Электродинамический измерительный прибор

Принцип действия электродинамического измерительного прибора основан на взаимодействии двух магнитных полей, создаваемых двумя катушками, одна из которых неподвижная, а другая вращается внутри первой.

Электродинамический прибор состоит из неподвижной 1 и подвижной 2 катушек (рисунок 4). Противодействующий момент создает пружина 3.

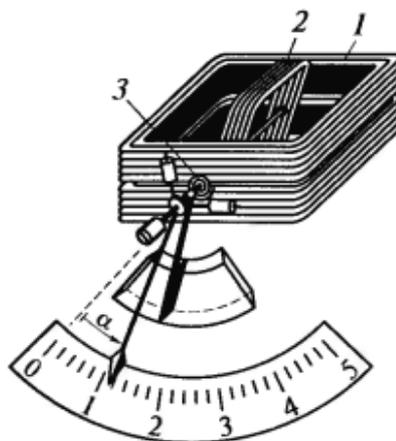


Рисунок 4. Прибор электродинамической системы.

Вращающий момент электродинамического механизма определяется так же, как электромагнитного механизма:

$$M_{вр} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}$$

где M – взаимная индуктивность катушек.

Вращающий момент электродинамического измерительного механизма пропорционален произведению токов в катушках и скорости изменения взаимной индуктивности M при повороте подвижной катушки, поэтому шкала прибора нелинейная.

Основные достоинства показывающих приборов электродинамической системы – высокий класс точности (до 0,1), независимость показаний от формы кривой измеряемого тока или напряжения.

Основные недостатки – низкая чувствительность вследствие слабого электромеханического действия магнитных полей катушек, неравномерность шкалы при измерении действующих значений тока и напряжения, сложность конструкции.

2.5 Схемы включения измерительных приборов

Так как электромеханические измерительные приборы напрямую могут использоваться только для измерения не больших значений токов и напряжений, то для диапазона измеряемых значений токов и напряжений используют схемы включения измерительных приборов:

схема включения амперметра;

схема включения вольтметра.

2.6 Схема включения амперметра

Так как напрямую через измерительный прибор можно пропускать только небольшой ток, то его необходимо запараллелить шунтовым сопротивлением, чтобы ограничить ток, проходящий через прибор. Таким образом, параллельно измерительному прибору подключается шунтовое сопротивление, которое должно быть меньше сопротивления прибора. Таким образом, общий ток проходит через цепь и равен сумме токов:

$$I = I_u + I_{ш}.$$

где I_u – ток цепи прибора, $I_{ш}$ – ток проходит через шунтовое сопротивление.

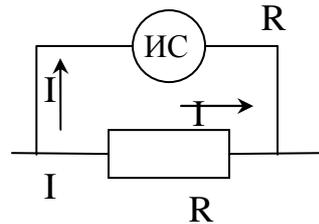


Рисунок 5 Схема включения амперметра

Известно, что при параллельном соединении сопротивлений общее напряжение остаётся одинаковым, а через меньшее сопротивление проходит наибольший ток:

$$I_u * R_u = I_{ш} * R_{ш} = I * \frac{R_u * R_{ш}}{R_u + R_{ш}} = const, \text{ отсюда выразим } R_{ш} = \frac{R_u}{n-1},$$

где $n = \frac{I}{I_u}$ коэффициент деления, называемый также множителем.

Таким образом, на базе существующего прибора можно изготовить любой прибор с увеличенным диапазоном измерений.

2.7 Схема включения вольтметра

С помощью измерительного механизма напрямую измерять напряжения больших величин нельзя, то последовательно измерительному механизму подключают добавочное сопротивление, которое «гасит лишнее напряжение» (см. рисунок 6). Таким образом, необходимо рассчитывать добавочное сопротивления для изготовления вольтметров для измерения нужных значений напряжения.

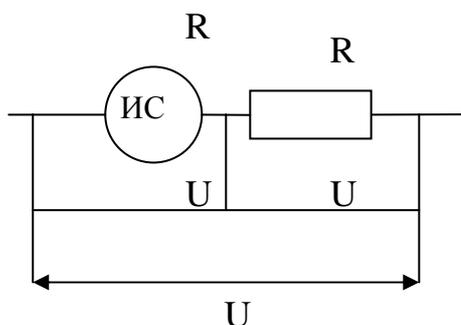


Рисунок 6 Схема подключения вольтметра

Известно, что при последовательном сопротивлении ток является одинаковым для всех участков цепи: $\frac{U_{II}}{R_{II}} = \frac{U_{Д}}{R_{Д}} = I$. А общее напряжение является суммой напряжений на отдельных участках $U = U_{Д} + U_{II}$. Отсюда можно рассчитать добавочное сопротивление, если известно сопротивление механизма и пределы напряжения для механизма и изготавливаемого прибора: $R_{Д} = R_{II} * [n - 1]$,

где $n = \frac{U}{U_{II}}$ коэффициент расширения предела измерения или множитель шкалы.

2.8 Примеры решения задач с применением электромеханических приборов.

Задача 1. На базе магнитоэлектрического микроамперметра на 100мкА с сопротивлением рамки 500Ом изготовить амперметр на 1 Ампер.

Решение. Необходимо рассчитать шунтовое сопротивление для этого воспользуемся формулой: $R_{ш} = \frac{R_{II}}{n-1}$, где $n = \frac{I}{I_{II}}$. Подставим

численные выражения в формулу: $R_{ш} = \frac{500OM}{\frac{1A}{1 \cdot 10^{-4} A} - 1} = 0,050M$.

Задача 2. На базе магнитоэлектрического микроамперметра на 100мкА с сопротивлением рамки 500Ом изготовить вольтметр на 10 Вольт.

Решение. Необходимо рассчитать добавочное сопротивление для этого воспользуемся формулой: $R_D = R_{II} * [n - 1]$, где $n = \frac{U}{U_{II}}$. Подставим численные выражения в формулу: $R_D = 500 \text{ Ом} \cdot \left(\frac{10 \text{ В}}{500 \text{ Ом} \cdot 1 \cdot 10^{-4}} - 1 \right) = 9.95 \cdot 10^4 \text{ Ом}$.

2.9 Методическая погрешность измерения вольтметром

При измерении напряжения на участке цепи с сопротивлением R вольтметром с внутренним сопротивлением R_V методическая погрешность будет определяться следующим способом:

Истинное значение напряжения на участке цепи находится по формуле:

$$U = I \cdot R$$

Напряжение, измеряемое вольтметром с учётом сопротивления вольтметра, будет:

$$U_x = I \cdot \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}$$

Отсюда истинное напряжение на участке цепи будет:

$$U = U_x \cdot \frac{R + R_V}{R_V}$$

Относительная погрешность будет:

$$\delta = \frac{|\Delta U|}{U} \cdot 100\% = \frac{\left| I \cdot R - I \frac{R \cdot R_V}{R + R_V} \right|}{I \cdot R} \cdot 100\% = \frac{R - \frac{R \cdot R_V}{R + R_V}}{R} \cdot 100\% = \frac{R}{R + R_V} \cdot 100\%$$

2.10 Методическая погрешность измерения амперметром

При измерении силы тока на участке цепи с сопротивлением R амперметром с внутренним сопротивлением R_a методическая погрешность будет определяться следующим способом:

Истинное значение силы тока на участке цепи находится по формуле:

$$I = \frac{U}{R}$$

Сила тока, измеряемая амперметром, с учётом сопротивления амперметра будет:

$$I_x = \frac{U}{R + R_a}$$

Отсюда истинное значение силы тока на участке цепи будет:

$$I = I_x \cdot \frac{R + R_a}{R}$$

Относительная погрешность будет:

$$\delta = \frac{|\Delta I|}{I} \cdot 100\% = \frac{\left| \frac{U}{R} - \frac{U}{R + R_a} \right|}{\frac{U}{R}} \cdot 100\% = \frac{\left| \frac{1}{R} - \frac{1}{R + R_a} \right|}{\frac{1}{R}} \cdot 100\% = \frac{R_a}{R + R_a} \cdot 100\%$$

2.11 Измерительные мосты

В измерительной технике широкое применение получили мостовые схемы, позволяющие точно измерять электрическое сопротивление отдельных участков цепи. Рассмотрим принцип действия и особенности измерительных мостов.

Измерительный мост – устройство для измерения электрического сопротивления.

Принцип измерения основан на взаимной компенсации сопротивлений двух звеньев, одно из которых включает измеряемое сопротивление. В качестве индикатора обычно используется микроамперметр, показания которого должны быть равны нулю в момент равновесия моста.

На схеме R_1, R_2, R_3, R_x – плечи моста, AD – диагональ питания, CB – измерительная диагональ. R_x представляет собой неизвестное сопротивление; R_1, R_2 и R_3 – известные сопротивления, причём значение R_2 может регулироваться. Если отношение сопротивлений R_1/R_2 равно отношению сопротивлений R_x/R_3 , то разность потенциалов между двумя средними точками будет равна нулю, и ток между ними не будет протекать. Сопротивление R_2 регулируется до получения равновесия, а направление протекания тока показывает, в какую сторону нужно регулировать R_2 .

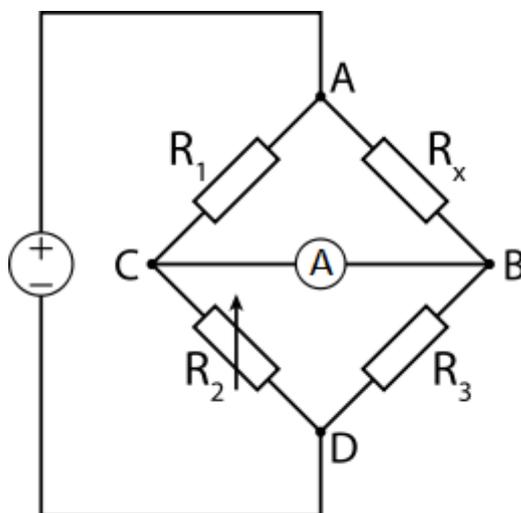


Рисунок7 Схема измерительного моста

С помощью микроамперметра момент равновесия можно установить с большой точностью, и если сопротивления R_1, R_2 и R_3 имеют маленькую погрешность, то R_x может быть измерено очень точно, ведь даже небольшие изменения R_x вызывают заметное нарушение баланса всего моста.

Таким образом, если мост сбалансирован (ток через микроамперметр), то измеряемое сопротивление находится по формуле

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}.$$

2.12 Цифровые приборы

В настоящее время развитие вычислительной технике привело к использованию цифровых измерительных средств для измерения различных физических величин.

Рассмотрим принципы работы цифрового прибора на примере цифрового вольтметра.

2.13 Цифровой вольтметр

В основу работы цифрового вольтметра входит аналого-цифровой преобразователь – измерительное устройство, предназначенное для преобразования аналогового сигнала в пропорциональный ему цифровой код. Далее цифровой код может сохраняться в памяти или выводиться на цифровой экран. При этом погрешность цифрового вольтметра — это единица младшего разряда.

Существует различные реализации АЦП рассмотрим две из них:

- время-импульсные преобразователи;
- преобразователи поразрядного кодирования.

2.14 Время-импульсные преобразователи

Принцип работы заключается в преобразовании измеряемого напряжения $U_{вх}$ в пропорциональный интервал времени, измеряемый числом N заполняющих его импульсов со стабильной частотой следования.

Преобразователь работает циклами, длительность которых устанавливается с помощью управляющего устройства УУ и обычно равна или кратна периоду питающей сети. Для единичного измерения U_x предусмотрен ручной запуск.

Структурная схема такого АЦП приведена на рисунке 8.

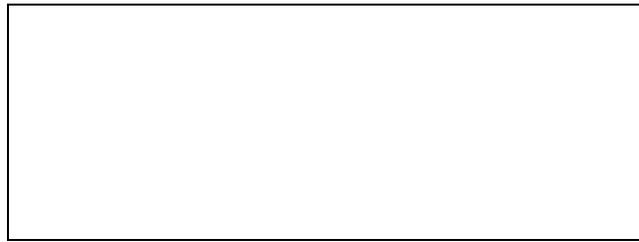


Рисунок 8 Структура время-импульсного преобразователя.

Преобразуемое напряжение $U_{вх}$ подается на первый вход компаратора К, на второй вход поступает линейно изменяющееся напряжение, формируемое генератором линейно-изменяющего напряжения (ГЛИН). Компаратор, в момент совпадения величин входных напряжений, вырабатывает импульс, который поступает на генератор счетных импульсов (ГСИ) и прерывает процесс генерации. Генератор тактовых импульсов ГТИ формирует импульсы большой скважности, которые синхронизируют моменты начала генерации ГЛИН и ГСИ, а также сбрасывают счетчик СЧ, на выходе которого формируется код. Значения этого кода пропорциональны величине измеряемого напряжения $U_{вх}$. Процесс работы преобразователя поясняет рисунок 9.

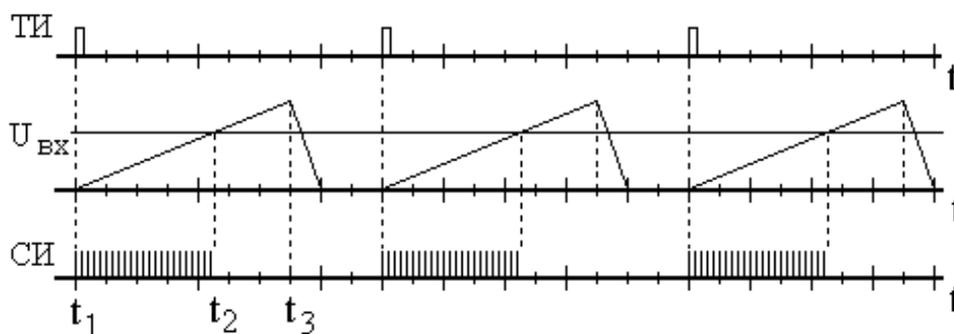


Рисунок 9 Диаграмма работы время-импульсного преобразователя.

Каждый тактовый импульс ТИ определяет момент t_1 начала процесса измерения. В момент t_2 линейно растущее напряжение ГЛИН достигает уровня $U_{вх}$, что вызывает прекращение формирования счетных импульсов СИ. Момент t_3 соответствует завершению периода формирования линейно изменяющегося напряжения, в этот момент считывается значение счетчика, которое и является цифровым кодом пропорциональным

измеряемому напряжению. Далее цифровой код можно передавать на цифровой экран.

Недостатком время-импульсных преобразователей считается большое время измерения.

2.15 Преобразователи поразрядного кодирования

Преобразователь поразрядного кодирования работает не циклами, а непрерывно реагируя на изменение измеряемого напряжения: сумма образцовых напряжений принимает большее или меньшее значение в зависимости от значения измеряемого напряжения. Когда достигается равенство $U_{вх} = \sum U_k$, код преобразуется в показание, а состояние прибора остается неизменным до тех пор, пока не изменится значение $U_{вх}$.

В этих преобразователях измеряемое напряжение $U_{вх}$ преобразуется в цифровой код путем последовательного сравнения его с рядом дискретных значений известной величины, изменяющихся по определенному закону.

Упрощенная структурная схема преобразователя поразрядного кодирования и диаграммы, поясняющие процесс сравнения $U_{вх}$ и U_k и формирование кодового сигнала (рисунок 10)

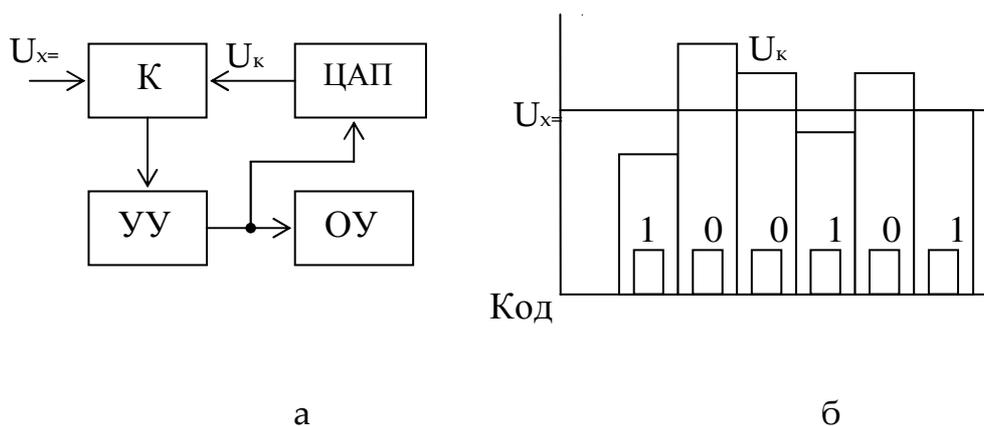


Рисунок 10 Структурная схема (а) и временная диаграмма (б)

Принципиальной особенностью такого преобразователя является наличие цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). С его помощью

реализуется цифровая отрицательная обратная связь путем преобразования цифрового двоичного кода в аналоговое $U_{вх}$. Таким образом, U_k изменяется по двоичной системе счисления. Сравнение $U_{вх}$ и U_k осуществляется в компараторе. Это сравнение всегда начинается со старшего разряда, подключаемого первым тактовым импульсом УУ. Если при этом $U_{вх} < U_k$ (рисунок 10 б), то компаратор не оказывает воздействия на УУ и оно следующим тактовым импульсом подключает в ЦАП напряжение очередного разряда U_k . Одновременно с этим УУ формирует двоичный код для ОУ и в данном случае в нем запоминается единица. Если теперь $U_{вх} > U_k$, срабатывает компаратор и воздействует на УУ, которое в свою очередь снимает в ЦАП напряжение этого разряда. Разряд пропускается, а в УУ запоминается 0. Далее очередным тактовым импульсом подключается напряжение следующего за пропущенным разряда и т.д. Процесс сравнения заканчивается после полного перебора всех разрядов U_k . Полученный код подается на ОУ, где он преобразуется, и результат измерения воспроизводится в цифровой форме в виде десятичного числа.

Данные преобразователи обладают высокой точностью и быстродействием.

3 Измерительные преобразователи

Мы рассмотрели примеры средств измерений для электрических величин. Для измерения неэлектрических измерений существует множество методов и средств измерений. В рамках данного курса рассмотрим методы измерений, основанные на преобразовании неэлектрических величин в электрические. Для этого необходимо преобразовать неэлектрическую величину в электрическую, а затем электрический сигнал измерить средством измерения электрических величин. При этом измеренное значение будет пропорционально измеряемой неэлектрической величине.

Первичные преобразователи неэлектрических величин в электрическую величину называются **датчиками**.

Основные виды преобразователей:

Реостатные преобразователи. Работают на изменении сопротивления реостата, движок которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины.

Проволочные преобразователи (тензосопротивления). Их работа основана на изменении сопротивления проволоки при ее деформации.

Термопреобразователи (терморезисторы, термосопротивления, термопары). В них изменяется сопротивление датчика под воздействием температуры, или основаны на возникновении термо ЭДС и ее зависимости от температуры.

Индуктивные преобразователи. В них при изменении положения разъемных частей магнитопровода (например, под действием силы, давления, линейного перемещения) меняется индуктивность катушки.

Емкостные преобразователи. Могут быть использованы в качестве датчиков перемещения, влажности, химсостава воздуха и др.

Фотоэлектрические преобразователи. В них измерительный прибор реагирует на изменение освещенности, температура, перемещения и др.

Индукционные преобразователи. Работают на принципе преобразования неэлектрической величины (например, скорости, ускорения) в индуктированную ЭДС.

Пьезоэлектрические преобразователи. Работают на принципе возникновения ЭДС при воздействии усилий на кристаллы некоторых материалов.

В зависимости от принципа действия датчики можно разделить на две большие группы: датчики параметрические и датчики генераторные.

Датчики параметрической группы характеризуются тем, что измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в параметр электрической цепи: сопротивление, индуктивность, взаимную индуктивность, емкость. Для обеспечения нормальной работоспособности таких датчиков необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

Генераторные датчики характеризуются тем, что в них осуществляется преобразование различных видов энергии в электрическую (генерирование электрической энергии под воздействием измеряемой неэлектрической величины).

По виду входных (измеряемых) величин датчики обычно разделяют на следующие группы:

1. Датчики перемещений.
2. Датчики усилий.
3. Датчики момента вращения.
4. Датчики размеров.
5. Датчики уровня.
6. Датчики скорости.

7. Датчики ускорения.
8. Датчики параметров вибраций.
9. Датчики давления и расхода.
10. Датчики температуры.
11. Датчики влажности.
12. Датчики для анализа состава вещества.

В пределах каждой группы возможно и дальнейшее разделение датчиков. Например, можно различать датчики линейного и углового перемещения, датчики высоких и низких температур и т.д.

Классификация датчиков

Классификация по виду выходных величин

- Активные (генераторные)
- Пассивные (параметрические)

Классификация по измеряемому параметру

- Датчики давления
 - абсолютного давления
 - избыточного давления
 - разрежения
 - давления-разрежения
 - разности давления
 - гидростатического давления
- Датчики расхода
 - Механические счетчики расхода
 - Перепадомеры
 - Ультразвуковые расходомеры
 - Электромагнитные расходомеры
 - Кориолисовые расходомеры
 - Вихревые расходомеры
- Уровня

- Поплавковые
- Ёмкостные
- Радарные
- Ультразвуковые
- Температуры
 - Термопара
 - Термометр сопротивления
 - Пирометр
- Датчик концентрации
 - Кондуктометры
- Радиоактивности (также именуется детекторами радиоактивности или излучений)
 - Ионизационная камера
 - Датчик прямого заряда
- Перемещения
 - Абсолютный шифратор
 - Относительный шифратор
- Положения
 - Контактные
 - Бесконтактные
- Фотодатчики
 - Фотодиод
 - Фотосенсор
- Датчик углового положения
 - Сельсин
 - Преобразователь угол-код
- Датчик вибрации
 - Датчик Пьезоэлектрический
 - Датчик вихретоковый

- Датчик механических величин
 - Датчик относительного расширения ротора
 - Датчик абсолютного расширения
- Датчик дуговой защиты

Классификация по принципу действия

- Оптические датчики (фотодатчики)
- Магнитоэлектрический датчик (На основе эффекта Холла)
- Пьезоэлектрический датчик
- Тензо преобразователь
- Ёмкостной датчик
- Потенциометрический датчик
- Индуктивный датчик

Классификация по характеру выходного сигнала

- Дискретные
- Аналоговые
- Цифровые
- Импульсные

Классификация по среде передачи сигналов

- Проводные
- Беспроводные

Классификация по количеству входных величин

- Одномерные
- Многомерные

Классификация по технологии изготовления

- Элементные
- Интегральные

Рассмотрим методы измерения основных неэлектрических величин с помощью измерительных преобразователей

Измерение различных неэлектрических величин (перемещений, усилий, температур и т. п.) электрическими методами выполняют с помощью устройств и приборов, преобразующих неэлектрические величины в зависимые от них электрические, которые измеряют электроизмерительными приборами со шкалами, градуированными в единицах измеряемых неэлектрических величин.

3.1 Измерение температуры

3.2 Термопара

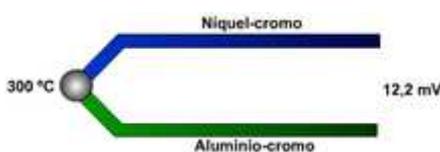


Рисунок 11 Схема термопары

При температуре спая нихрома и алюминий-никеля равной 300°C термоэдс составляет 12,2 мВ.



Рисунок 12 Термопара

Термопара (термоэлектрический преобразователь температуры) — термоэлемент, применяемый в измерительных и преобразовательных устройствах, а также в системах автоматизации.

Международный стандарт на термопары МЭК 60584 (п.2.2) дает следующее определение термопары: Термопара — пара проводников из различных материалов, соединенных на одном конце и формирующих часть устройства, использующего термоэлектрический эффект для измерения температуры.

Для измерения разности температур зон, ни в одной из которых не находится вторичный преобразователь (измеритель термо-ЭДС), удобно

использовать дифференциальную термопару: две одинаковых термопары, соединенных навстречу друг другу. Каждая из них измеряет перепад температур между своим рабочим спаем и условным спаем, образованным концами термопар, подключёнными к клеммам вторичного преобразователя, но вторичный преобразователь измеряет разность их сигналов, таким образом, две термопары вместе измеряют перепад температур между своими рабочими спаями.

Принцип действия

Принцип действия основан на эффекте Зеебека или, иначе, термоэлектрическом эффекте.

Эффект Зеебека – явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников, контакты между которыми находятся при различных температурах.

Эффект Зеебека также иногда называют просто термоэлектрическим эффектом.

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, возникает термо-ЭДС, если места контактов поддерживают при разных температурах. Цепь, которая состоит только из двух различных проводников, называется термоэлементом или термопарой.

Величина возникающей термо-ЭДС в первом приближении зависит только от материала проводников и температур горячего (T_1) и холодного (T_2) контактов.

В небольшом интервале температур термо-ЭДС E можно считать пропорциональной разности температур:

$$E = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

где α_{12} — термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термо-ЭДС).

В простейшем случае коэффициент термо-ЭДС определяется только материалами проводников, однако, строго говоря, он зависит и от температуры, и в некоторых случаях с изменением температуры α_{12} меняет знак.

Более корректное выражение для термо-ЭДС:

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT$$

Величина термо-ЭДС составляет милливольты при разности температур в 100 К и температуре холодного спая в 0°С (например, пара медь-константан даёт 4,25 мВ, платина-платинородий — 0,643 мВ, нихром-никель — 4,1 мВ).

Возникновение эффекта Зеебека вызвано несколькими составляющими.

3.2.1 Различная зависимость средней энергии электронов от температуры в различных веществах

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках в дополнение к этому концентрация электронов проводимости растёт с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся не скомпенсированный положительный заряд. Процесс накопления заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется объёмной ЭДС.

3.2.2 Различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов

Контактная разность потенциалов вызвана отличием энергий Ферми у контактирующих различных проводников. При создании контакта химические потенциалы электронов становятся одинаковыми, и возникает контактная разность потенциалов, равная

$$U = \frac{F_2 - F_1}{e},$$

где F — энергия Ферми, e — заряд электрона.

На контакте тем самым существует электрическое поле, локализованное в тонком при контактном слое. Если составить замкнутую цепь из двух металлов, то U возникает на обоих контактах. Электрическое поле будет направлено одинаковым образом в обоих контактах — от большего F к меньшему. Это значит, что если совершить обход по замкнутому контуру, то в одном контакте обход будет происходить по полю, а в другом — против поля.

Если температура одного из контактов изменится на dT , то, поскольку энергия Ферми зависит от температуры, U также изменится. Но если изменилась внутренняя контактная разность потенциалов, то изменилось электрическое поле в одном из контактов, и поэтому циркуляция вектора E будет отлична от нуля, то есть появляется ЭДС в замкнутой цепи.

Данная ЭДС называется *контактная ЭДС*.

Если оба контакта термоэлемента находятся при одной и той же температуре, то и контактная, и объёмная термо-ЭДС исчезают.

Между соединёнными проводниками имеется контактная разность потенциалов; если стыки связанных в кольцо проводников находятся при одинаковой температуре, сумма таких разностей потенциалов равна нулю. Когда же стыки находятся при разных температурах, разность потенциалов

между ними зависит от разности температур. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называют коэффициентом термо-ЭДС. У разных металлов коэффициент термо-ЭДС разный и, соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, будет различная. Помещая спай из металлов с отличными коэффициентами термо-ЭДС в среду с температурой T_1 , мы получим напряжение между противоположными контактами, находящимися при другой температуре T_2 , которое будет пропорционально разности температур T_1 и T_2 .

3.3 Способы подключения.

Наиболее распространены два способа подключения термопары к измерительным преобразователям: простой и дифференциальный. В первом случае измерительный преобразователь подключается напрямую к двум термоэлектродам. Во втором случае используются два проводника с разными коэффициентами термо-ЭДС, спаянные в двух концах, а измерительный преобразователь включается в разрыв одного из проводников.

Для дистанционного подключения термопар используются удлинительные или компенсационные провода. Удлинительные провода изготавливаются из того же материала, что и термоэлектроды, но могут иметь другой диаметр. Компенсационные провода используются в основном с термопарами из благородных металлов и имеют состав, отличный от состава термоэлектродов. Требования к проводам для подключения термопар установлены в стандарте МЭК 60584-3. Следующие основные рекомендации позволяют повысить точность измерительной системы, включающей термопарный датчик:

— Миниатюрную термопару из очень тонкой проволоки следует подключать только с использованием удлинительных проводов большего диаметра;

— Не допускать по возможности механических натяжений и вибраций термопарной проволоки;

— При использовании длинных удлинительных проводов, во избежании наводок, следует соединить экран провода с экраном вольтметра и тщательно перекручивать провода;

— По возможности избегать резких температурных градиентов по длине термопары;

— Материал защитного чехла не должен загрязнять электроды термопары во всем рабочем диапазоне температур и должен обеспечить надежную защиту термопарной проволоки при работе во вредных условиях;

— Использовать удлинительные провода в их рабочем диапазоне и при минимальных градиентах температур;

— Для дополнительного контроля и диагностики измерений температуры применяют специальные термопары с четырьмя термоэлектродами, которые позволяют проводить дополнительные измерения сопротивления цепи для контроля целостности и надежности термопар.

3.4 Применение термопар

Для измерения температуры различных типов объектов и сред, а также в автоматизированных системах управления и контроля. Термопары из вольфрам-рениевого сплава являются самыми высокотемпературными контактными датчиками температуры. Такие термопары незаменимы в металлургии для контроля температуры расплавленных металлов.

В 1920^x-30^x годах термопары использовались для питания детекторных приемников и других слаботочных приборов. Вполне возможно использование термогенераторов для подзарядки АКБ современных слаботочных приборов (телефоны, камеры и т.п) с использованием открытого огня.

Преимущества термопар

- Высокая точность измерения значений температуры (измеряется до $\pm 0,01$ °C)
- Большой температурный диапазон измерения: от -200 °C до 2500 °C
- Простота
- Дешевизна
- Надежность

Недостатки

- Для получения высокой точности измерения температуры (до $\pm 0,01$ °C) требуется индивидуальная градуировка термопары.
- На показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку. В современных конструкциях измерителей на основе термопар используется измерение температуры блока холодных спаев с помощью встроенного термистора или полупроводникового сенсора и автоматическое введение поправки к измеренной ТЭДС.
- Эффект Пельтье (в момент снятия показаний, необходимо исключить протекание тока через термопару, так как ток, протекающий через неё, охлаждает горячий спай и разогревает холодный).
- Зависимость ТЭДС от температуры существенно нелинейна. Это создает трудности при разработке вторичных преобразователей сигнала.

- Возникновение термоэлектрической неоднородности в результате резких перепадов температур, механических напряжений, коррозии и химических процессов в проводниках приводит к изменению градуировочной характеристики и погрешностям до 5 К.
- На большой длине термопарных и удлинительных проводов может возникать эффект «антенны» для существующих электромагнитных полей.

3.5 Типы термопар

Технические требования к термопарам определяются ГОСТ 6616-94. Стандартные таблицы для термоэлектрических термометров (НСХ), классы допуска и диапазоны измерений приведены в стандарте МЭК 60584-1,2 и в ГОСТ Р 8.585-2001.

- платинородий-платиновые — ТПП13 — Тип R
- платинородий-платиновые — ТПП10 — Тип S
- платинородий-платинородиевые — ТПР — Тип В
- железо-константановые (железо-медьникелевые) ТЖК — Тип J
- медь-константановые (медь-медьникелевые) ТМКн — Тип T
- нихросил-нисиловые (никельхромникель-никелькремниевые) ТНН — Тип N.
- хромель-алюмелевые — ТХА — Тип K
- хромель-константановые ТХКн — Тип E
- хромель-копелевые — ТХК — Тип L
- медь-копелевые — ТМК — Тип M
- силъх-силиновые — ТСС — Тип I
- вольфрам и рений — вольфрамрениевые — ТВР — Тип А-1, А-2, А-3

3.6 Термометр сопротивления

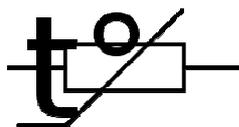


Рисунок 13 Схема термометра сопротивлений

Термометр сопротивления – датчик для измерения температуры, сопротивление чувствительного элемента которого зависит от температуры. Может быть выполнен из металлического или полупроводникового материала. В последнем случае называется термистором.

Металлический термометр сопротивления

Представляет собой резистор, выполненный из металлической проволоки или плёнки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Наиболее распространённый тип термометров сопротивления – платиновые термометры. Это объясняется тем, что платина имеет высокий температурный коэффициент сопротивления и высокую стойкость к окислению. Эталонные термометры изготавливаются из платины высокой чистоты с температурным коэффициентом не менее 0,003925. В качестве рабочих средств измерений применяются также медные и никелевые термометры. Действующий стандарт на технические требования к рабочим термометрам сопротивления: ГОСТ Р 8.625-2006 (Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний). В стандарте приведены диапазоны, классы допуска, таблицы НСХ и стандартные зависимости сопротивление-температура. Стандарт соответствует международному стандарту МЭК 60751 (2008). В стандарте впервые отказались от нормирования конкретных номинальных сопротивлений. Сопротивление изготовленного термометра может быть любым. Промышленные платиновые термометры сопротивления в

большинстве случаев используются со стандартной зависимостью сопротивление-температура (НСХ), что обуславливает погрешность не лучше $0,1^{\circ}\text{C}$ (класс АА при 0°C). Термометры сопротивления на основе напыленной на подложку плёнки отличаются повышенной вибропрочностью, но меньшим диапазоном температур. Максимальный диапазон, в котором установлены классы допуска платиновых термометров для проволочных чувствительных элементов составляет 660°C (класс С), для плёночных 600°C (класс С).

3.7 Измерительные преобразователи давления

Датчик давления – устройство, физические параметры которого изменяются в зависимости от давления измеряемой среды (жидкости, газы, пар). В датчиках давление измеряемой среды преобразуется в унифицированный пневматический, электрический сигналы или цифровой код.

3.7.1 Принципы реализации

Датчик давления состоит из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент – приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей, в том числе для герметичного соединения датчика с объектом и защиты от внешних воздействий и устройства вывода информационного сигнала. Основными отличиями одних приборов от других являются пределы измерений, динамические и частотные диапазоны, точность регистрации давления, допустимые условия эксплуатации, массогабаритные характеристики, которые зависят от принципа преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, емкостной, индуктивный, резонансный, ионизационный, пьезоэлектрический и другие.

3.7.2 Тензометрический метод

Чувствительные элементы датчиков базируются на принципе изменения сопротивления деформации тензорезисторов, приклеенных к упругому элементу, который деформируется под действием давления.

3.7.3 Пьезорезистивный метод

Основан на интегральных чувствительных элементах из монокристаллического кремния. Кремниевые преобразователи имеют высокую чувствительность благодаря изменению удельного объемного сопротивления полупроводника при деформировании давлением. Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются, так называемые, Low cost – решения, основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с защитой силиконовым гелем. Для измерения агрессивных сред и большинства промышленных применений используется преобразователь давления в герметичном металло-стеклянном корпусе, с разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды посредством кремнийорганической жидкости.

3.7.4 Ёмкостной метод

Ёмкостные преобразователи используют метод изменения ёмкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые ёмкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости. В элементе из керамики или кремния пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью. Недостаток – нелинейная зависимость емкости от приложенного давления.

3.7.5 Резонансный метод

В основе метода лежит изменение резонансной частоты колеблющегося упругого элемента при деформировании его силой или давлением. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора. К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, невозможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

3.7.6 Индуктивный метод

Основан на регистрации вихревых токов (токов Фуко). Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном. Преобразователь измеряет смещение мембраны при отсутствии механического контакта. В катушках генерируется электрический сигнал переменного тока таким образом, что заряд и разряд катушек происходит через одинаковые промежутки времени. При отклонении мембраны создается ток в фиксированной основной катушке, что приводит к изменению индуктивности системы. Смещение характеристик основной катушки дает возможность преобразовать давление в стандартизованный сигнал, по своим параметрам прямо пропорциональный приложенному давлению.

3.7.7 Ионизационный метод

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются ламповые диоды. Лампа оснащена двумя электродами: катодом и анодом, - а также нагревателем. В некоторых лампах последний отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Преимуществом таких ламп является возможность регистрировать низкое давление — вплоть до

глубокого вакуума с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например, емкостными. Зависимость сигнала от давления является логарифмической.

3.7.8 Пьезоэлектрический метод

В основе лежит прямой пьезоэлектрический эффект, при котором пьезоэлемент генерирует электрический сигнал, пропорциональный действующей на него силе или давлению. Пьезоэлектрические датчики используются для измерения быстроменяющихся акустических и импульсных давлений, обладают широкими динамическими и частотными диапазонами, имеют малую массу и габариты, высокую надежность и могут использоваться в жестких условиях эксплуатации.

3.8 Регистрация сигналов датчиков давления

Сигналы с датчиков давления могут быть как медленноменяющимися, так и быстропеременные. В первом случае их спектр лежит в области низких частот. Для того, чтобы с высокой точностью оцифровать такой сигнал необходимо подавить высокочастотную часть спектра, полностью состоящую из помех. Это особенно актуально в промышленных условиях. Специально для ввода медленноменяющихся сигналов используются интегрирующие АЦП. Они проводят измерение не мгновенного значения сигнала (которое изменяется под действием помех), а интегрируют сигнальную функцию за заданный промежуток времени, который заведомо меньше постоянной времени процессов, происходящих в контролируемой среде, но заведомо больше периода самой низкочастотной помехи. Интегрирующие АЦП выпускают многие зарубежные фирмы (Texas Instruments, Analog Devices и др).

Для измерения переменных давлений применяют датчики с аналоговым выходным сигналом, например, 0-20,4-20 мА и 0-5, 0,4-2 В.

Пьезоэлектрические датчики применяются для измерения быстропеременных процессов в диапазоне частот от единиц Гц до сотен кГц.

3.9 Измерительные преобразователи расхода

Расходомер – прибор, измеряющий расход вещества, проходящего через данное сечение трубопровода в единицу времени. Если прибор имеет интегрирующее устройство со счетчиком и служит для одновременного измерения и количества вещества, то его называют расходомером со счетчиком.

3.10 Механические счётчики расхода

3.10.1 Ёмкость и секундомер

Возможно, самый простой способ измерить расход – это использовать некоторую ёмкость и секундомер. Поток жидкости направляется в некоторую ёмкость, и по секундомеру засекается время заполнения этой ёмкости. Зная объём ёмкости, и поделив его на время её заполнения, можно узнать расход жидкости. Этот способ подразумевает прерывание нормального течения потока.

3.10.2 Шестерёнчатые расходомеры

Впервые расходомер с овальными шестернями был изобретен компанией Worr & Reuther (Германия) в 1932 году. Измеряемый элемент состоит из двух шестеренок овальной формы. Протекающая жидкость вращает данные шестеренки. При каждом обороте пары овальных колес, через прибор проходит строго определенное количество жидкости. Считывая количество оборотов, можно точно определить, какой объем жидкости протекает через прибор. Данные расходомеры отличаются

высокой точностью, надежностью и простотой, что позволяет их использовать для жидкостей с высокой температурой и под большим давлением. Отличительной особенностью расходомеров с овальными шестернями является возможность использования для жидкостей с высокой вязкостью (мазут, битум и т.д.)

3.10.3 Расходомеры на базе объёмных гидромашин

В системах объёмного гидропривода для измерения объёмного расхода рабочей жидкости применяют объёмные гидромашин (как правило, шестерённые или аксиально-плунжерные гидромашин).

Объёмная гидромашин в этом случае работает как гидродвигатель, но без нагрузки на валу. Тогда объёмный расход через гидромашин можно определить по формуле:

$$Q = q_0 \cdot n,$$

где

Q — объёмный расход,

q_0 — рабочий объём гидромашин (определяется по паспорту гидромашин),

n — частота вращения выходного вала гидромашин, которую можно измерить тахометром.

Объёмная гидромашин пропускает через себя весь расход жидкости, что для объёмного гидропривода не представляет сложности ввиду малых расходов.

3.11 Вентури-метры

Принцип действия расходомеров этого типа основан на эффекте Вентури. Вентури-расходомер сужает поток жидкости в некотором устройстве, и датчики давления измеряют разницу давлений перед указанным устройством и непосредственно в месте сужения. Этот метод

измерения расхода широко используется при транспортировке газов по трубопроводам, и использовался ещё во времена Римской империи.

Эффект Вентури заключается в падении давления, когда поток жидкости или газа протекает через суженную часть трубы.

Эффект Вентури является следствием уравнения Бернулли, определяющего связь между скоростью v жидкости, давлением p в ней и высотой h частиц над площадью отсчёта:

$$h + \frac{v}{2g} + \frac{p}{\rho g} = const,$$

где

ρ — плотность жидкости;

g — ускорение свободного падения;

$\frac{p}{\rho g}$ — пьезометрический напор;

$\frac{v^2}{2g}$ — динамический напор.

Если уравнение Бернулли записать для двух сечений потока, то будем иметь:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

Для горизонтального потока средние члены в левой и правой частях уравнения равны между собой, и потому сокращаются, и равенство принимает вид:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

то есть при установившемся горизонтальном течении идеальной несжимаемой жидкости в каждом её сечении сумма пьезометрического и динамического напоров будет постоянной. Для выполнения этого условия в тех местах потока, где средняя скорость жидкости выше (то есть,

в узких сечениях), её динамический напор увеличивается, а гидростатический напор уменьшается (и значит, уменьшается давление).

Эффект Вентури наблюдается или используется в следующих объектах:

- в гидроструйных насосах, в частности, в танкерах для продуктов нефтяной и химической промышленности;
- в горелках, которые смешивают воздух и горючие газы в гриле, газовой плите, горелке Бунзена и аэрографах;
- в трубках Вентури – сужающих элементах расходомеров Вентури;
- в расходомерах Вентури;
- в водяных аспираторах эжекторного типа, которые создают небольшие разрежения с использованием кинетической энергии водопроводной воды;
- пульверизаторах (опрыскивателях) для распыления краски, воды или ароматизации воздуха.
- карбюраторах, где эффект Вентури используется для всасывания бензина во входной воздушный поток двигателя внутреннего сгорания;
- в автоматизированных очистителях плавательных бассейнов, которые используют давление воды для собирания осадка и мусора;
- в кислородных масках для кислородной терапии и др.

3.12 Измерение расхода

Эффект Вентури может быть использован для измерения объёмного расхода Q .

Так как

$$\begin{cases} Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \\ p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \end{cases},$$

то

$$Q = A_1 \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}} = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\left(1 - \frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)}}$$

где

A_1 и A_2 — площади поперечного сечения потоков, соответственно, в широкой и узкой частях потока;

p_1 и p_2 — давления, соответственно, в широкой и узкой частях потока.

3.13 Дисквая диафрагма

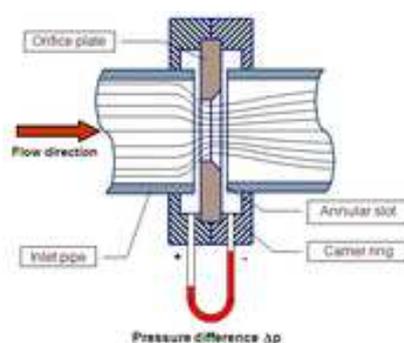


Рисунок 14 Дисквая диафрагма

Диафрагма представляет собой диск со сквозным отверстием, вставленный в поток. Дисквая диафрагма сужает поток, и разница давлений, измеряемая перед и после диафрагмы, позволяет определить расход в потоке. Этот тип расходомера можно грубо считать одной из форм Вентури-метров, однако имеющую более высокие потери энергии. Существует три типа дисковых диафрагм: концентрические, эксцентриковые и сегментальные.

3.14 Трубка Пито

Расходомеры на основе трубки Пито измеряют динамическое давление

$$p_d \approx \xi \frac{\rho V_0^2}{2} \text{ в застойной зоне потока (англ.).}$$

С помощью уравнения Бернулли, и зная динамическое давление, можно определить скорость потока, а значит, и объёмный расход ($Q=SV$, где S — площадь поперечного сечения потока, V — средняя скорость потока).

3.15 Оптические расходомеры

Оптические расходомеры используют свет для определения расхода.

3.16 Расходомеры на основе двух лазерных лучей

Маленькие частички, которые неизбежно содержатся в природных и промышленных газах, проходят через два лазерных луча, направленных на поток от источника. Свет лазера рассеивается, когда частичка проходит через первый лазерный луч. Рассеянный лазерный луч поступает на фотодетектор, который в результате генерирует электрический импульсный сигнал. Если та же самая частица пересекает второй лазерный луч, то рассеянный лазерный свет поступает на второй фотодетектор, который генерирует второй импульсный электрический сигнал. Измеряя интервал времени между двумя этими импульсами, можно вычислить скорость газа по формуле $V = D / T$, где D – расстояние между двумя лазерными лучами, T – время между двумя импульсами. Зная скорость потока, можно определить расход ($Q = VS$, где S – площадь поперечного сечения потока).

Основанные на лазерах расходомеры измеряют скорость частиц – параметр, который не зависит от теплопроводности, вида газа или его состава. Лазерная технология позволяет получать очень точные данные, причём даже в тех случаях, когда другие методы применять не удаётся или они дают большую погрешность: при высоких температурах, малых расходах, высоких давлениях, высокой влажности, вибрациях трубопроводов и акустическом шуме.

Оптические расходомеры способны измерять скорости потока от значений 0.1 м/с до более чем 100 м/с.

3.17 Расчет сужающего устройства

При выборе сужающего устройства необходимо руководствоваться следующими соображениями: потеря давления (энергетические потери) в сужающих устройствах увеличивается в следующей последовательности: труба Вентури, длинное сопло Вентури, короткое сопло Вентури, сопло, диафрагма; при одних и тех же значениях m и n прочих равных условиях сопло позволяет измерять больший расход, чем диафрагма, и обеспечивает более высокую точность измерения по сравнению с диафрагмой (особенно при малых значениях m); изменение или загрязнение входного профиля сужающего устройства в процессе эксплуатации влияет на коэффициент расхода диафрагмы в большей степени, чем на коэффициент расхода сопла.

Таблица 4 Исходные данные для расчета сужающего устройства

| Наименование параметра | Обозначение | Значение |
|--|----------------------|---|
| Технологическая среда | | Дом. газ |
| Расчетный расход, $\text{Нм}^3/\text{час}$ $Q_{\text{ном}} \text{ пр } 250000$ | | |
| Молярная концентрация компонентов газовой смеси окись углерода, дол/едэтан, дол/едводород, дол/ед двуокись углерода, дол/ед метан, дол/ед азот, дол/ед кислород, дол/ед | N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 | 0,237 0,002 0,1 0,17 0,005 0,485 0,001 |
| Температура, ОС | t | 30 |
| Внутренний диаметр трубопровода, мм | D20 | 2000 |
| Абсолютная шероховатость трубопровода, мм | K | 0,22 |
| Абсолютная температура, К | T | 303.16 |
| Относительная влажность, % | ϕ 100 | |
| Давление избыточное, | | |

| Наименование параметра | Обозначение | Значение |
|--|-----------------------|--------------------|
| кгс/см ² $P_{\text{из}}$ 0,016 | | |
| Давление барометрическое, мм.рт.ст. | $P_{\text{б}}$ 751,5 | |
| Максимальный расход сухой части влажного газа приведенный к нормальным условия, м3/час | $Q_{\text{ном.мах}}$ | 250000 |
| Средний расход сухой части газа, м3/час | $Q_{\text{ном.ср}}$ | 80000 |
| Предельный номинальный перепад давления дифманометра, кгс/см ² | $\Delta P_{\text{н}}$ | 250 |
| Имеющаяся длина прямолинейного участка трубопровода: | $L_{\text{пт}}$ | 60 |
| Тип местного сопротивления в начале прямолинейного участка трубопровода: | - | Вход в трубопровод |
| Материал диафрагмы | - | X23H13 |
| Абсолютная шероховатость трубопровода | δ | 0,097 |

Внутренний диаметр трубопровода при рабочей температуре определяется по формуле:

$$D = K_t \cdot D_{20}, \quad (3.17.1)$$

где K_t – поправочный множитель на тепловое расширение материала трубопровода, зависит от температуры ($t=30\text{ }^{\circ}\text{C} \Rightarrow K_t = 1$);

D_{20} – внутренний диаметр трубопровода;

$$K_t = 1,$$

$$D_{20} = 2000 \text{ мм (2 м)};$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.1):

$$D = 1 \cdot 2000 = 2000 \text{ мм (2 м)};$$

Абсолютное давление измеряемого газа определяется по формуле:

$$P = P_{\text{из}} + 1,355 \cdot 10^{-3} \cdot P_{\text{б}}, \quad (3.17.2)$$

где $P_{\text{из}}$ – давление избыточное ($=0,016 \text{ кгс/см}^2$);

$P_{\text{б}}$ – давление барометрическое ($=751,5 \text{ мм.рт.ст.}$);

Полученные данные подставим в формулу (3.17.2):

$$P = 0,016 + 1,355 \cdot 10^{-3} \cdot 751,5 = 1,034 \text{ кгс/см}^2;$$

Абсолютная температура измеряемого газа определяется по формуле: $T = t + 273,16$, (3.17.3)

где t - температура газа; $t = 30^0$;

Полученные данные подставим в формулу (3.17.3);

$$T = 30^0 + 273,16 = 303,16 \text{ К}$$

Плотность сухой части влажного газа в рабочих условиях определяется по формуле:

$$\rho_{C.T} = 283,73 \cdot \rho_{ном} \cdot \frac{P - \varphi \cdot P_{ВЛ.МАХ}}{T \cdot K}, \quad (3.17.4)$$

где $\rho_{ном}$ – плотность сухого газа в нормальных условиях;

$P_{ВЛ.МАХ}$ – наибольшее возможное давление водяного пара во влажном газе при температуре t ;

K – коэффициент сжимаемости сухого газа при рабочих давлениях и температуре;

$$P_{ВЛ.МАХ} = 0,04325 \text{ кгс/см}^2$$

$CO = 1,165$ (окись углерода);

$C_2H_4 = 1,2600$ (этан);

$H_2 = 0,0837$ (водород);

$CO_2 = 1,8346$ (двуокись углерода);

$CH_4 = 0,6681$ (метан);

$N_2 = 1,1889$ (азот);

$O_2 = 1,3311$ (кислород);

$N_1(CO) = 0,237$;

$N_2(C_2H_4) = 0,002$;

$N_3(H_2) = 0,1$;

$N_4(CO_2) = 0,17$;

$$N_5(CH_4) - 0,005;$$

$$N_6(N_2) - 0,485;$$

$$N_7(O_2) - 0,001;$$

$$\rho_{НОМ} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot P_{НОМ} \quad (3.17.5)$$

$$\rho_m = 0,237 \cdot 1,165 + 0,002 \cdot 1,2600 + 0,1 \cdot 0,0837 + 0,17 \cdot 1,8346 + 0,005 \cdot 0,6681 +$$

$$+ 0,485 \cdot 1,1889 + 0,001 \cdot 1,3311 = 1,18ea/i^3$$

$$\varphi = 100\%$$

$$P = 1.034 \text{ кгс/см}^2;$$

$$T = 303.16 \text{ К};$$

$$K = 1;$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.4);

$$\rho_{с.т} = 283,73 \cdot 1,18 \frac{1,034 - 1 \cdot 0,04325}{303,16 \cdot 1} = 283,73 \cdot 1,18 \cdot 0,003 = 1,094 \text{ кг/м}^3;$$

Плотность водяного пара во влажном газе в рабочих условиях определяется по формуле:

$$\rho_{ВП} = \varphi \cdot \rho_{ВПМАХ}, \quad (3.17.6)$$

где $\rho_{ВПМАХ}$ – возможная наибольшая плотность водяного пара во влажном газе при давлении P и температуре t . Если $t < t_{н.с.}$, то $\rho_{ВПМАХ} = \rho_{нп}$, где $\rho_{нп}$ – плотность насыщенного водяного пара, зависит от температуры. Если $t > t_{н.с.}$, то $\rho_{ВПМАХ}$ = плотности перегретого водяного пара, зависит от давления и температуры.

$$\varphi - \text{относительная влажность; } \varphi = 100\%;$$

$$\rho_{ВПМАХ} = 0,03036;$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.6);

$$\rho_{ВП} = 1 \cdot 0,03036 = 0,03036 \text{ кг/м}^3$$

Плотность влажного газа в рабочем состоянии определяется по формуле:

$$\rho = \rho_{с.т} + \rho_{вп}, \quad (3.17.7)$$

$$\rho_{с.т} = 1,094 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{вп} = 0,03036 \text{ кг/м}^3;$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.6);

$$\rho = 1,094 + 0,03036 = 1,125 \text{ кг/м}^3$$

Молярная концентрация сухой части газа во влажном газе определяется по формуле:

$$N_1 = \frac{0,7496 \cdot \rho_{с.т}}{0,7496 \cdot \rho_{с.т} + \rho_{НОМ} \cdot \rho_{вп}} \quad (3.17.8)$$

$$\rho_{с.т} = 1,094 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{НОМ} = 1,18 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{вп} = 0,03036 \text{ кг/м}^3;$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.8);

$$N_1 = \frac{0,7496 \cdot 1,094}{0,7496 \cdot 1,094 + 1,18 \cdot 0,03036} = \frac{0,820}{0,856} = 0,958$$

Молярная концентрация пара во влажном газе определяется по формуле: $N_2 = \frac{\rho_{НОМ} \cdot \rho_{вп}}{0,7496 \cdot \rho_{с.т} + \rho_{НОМ} \cdot \rho_{вп}}$ (3.17.9)

$$\rho_{НОМ} = 1,18 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{вп} = 0,03036 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{с.т} = 1,094 \text{ кг/м}^3;$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.9);

$$N_2 = \frac{1,18 \cdot 0,03036}{0,7496 \cdot 1,094 + 1,18 \cdot 0,03036} = \frac{0,036}{0,856} = 0,042$$

Динамическая вязкость влажного газа в рабочих условиях определяется по формуле:

$$\mu_{см} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sqrt{M_i} \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n N_i \sqrt{M_i}}, \quad (3.17.10)$$

где M_i – молекулярный вес i -того компонента;

μ_i – вязкость i -того компонента при рабочей температуре и атмосферном давлении, определяется по формуле:

$$\mu_i = 0,27219 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\sqrt{M_i \cdot T}}{\sigma_{oi}^2 \cdot \Omega_{\mu i}}, \quad (3.17.11)$$

где σ_{oi} – потенциал Штокмахера i -того компонента;

$\Omega_{\mu i}$ – интеграл столкновений i -того компонента, зависит от безразмерной температуры T_i^* i -того компонента;

$$T_i^* = \frac{T}{\varepsilon / K}, \quad (3.17.12)$$

где ε / K – табличная величина;

$\Omega_{M1} = 1,279$ CO₂ – двуокись углерода

$$T_1^* = \frac{303,16}{190} = 1,596$$

$\Omega_{M2} = 1,399$ C₂H₄ – этан

$$T_2^* = \frac{303,16}{236} = 1,285$$

$\Omega_{M3} = 0,8379$ H₂ – водород

$$T_3^* = \frac{303,16}{33,3} = 9,104$$

$\Omega_{M4} = 1,058$ CO – окись углерода

$$T_4^* = \frac{303,16}{110} = 2,756$$

$\Omega_{M5} = 1,138$ CH₄ – метан

$$T_5^* = \frac{303,16}{140} = 2,165$$

$\Omega_{M6} = 1,014$ N₂ – азот

$$T_6^* = \frac{303,16}{91,5} = 3,313$$

$$\Omega_{M7} = 1,007 \text{ O}_2 - \text{кислород}$$

$$T_7^* = \frac{303,16}{88} = 3,445$$

$$\Omega_{M8} = 2,492 - \text{водяной пар}$$

$$T_8^* = \frac{303,16}{809,1} = 0,375$$

$$\mu_1 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{44,011 \cdot 303,16}}{3,996^2 \cdot 1,279} = 0,000001539 = 1,54 \cdot 10^{-6} \text{ CO}_2 - \text{двуокись}$$

углерода

$$\mu_2 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{30,068 \cdot 303,16}}{4,384^2 \cdot 1,399} = 0,00000097 = 0,97 \cdot 10^{-6} \text{ C}_2\text{H}_4 - \text{этан}$$

$$\mu_3 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{28,011 \cdot 303,16}}{3,69^2 \cdot 1,058} = 0,000001839 = 1,839 \cdot 10^{-6} \text{ CO} - \text{окись}$$

углерода

$$\mu_4 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{2,016 \cdot 303,16}}{2,968^2 \cdot 0,8379} = 0,000000911 = 0,911 \cdot 10^{-6} \text{ H}_2 - \text{водород}$$

$$\mu_5 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{16,042 \cdot 303,16}}{3,808^2 \cdot 1,138} = 0,00000115 = 1,15 \cdot 10^{-6} \text{ CH}_4 - \text{метан}$$

$$\mu_6 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{28,016 \cdot 303,16}}{3,681^2 \cdot 1,014} = 1,825 \cdot 10^{-6} \text{ N}_2 - \text{метан}$$

$$\mu_7 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{32 \cdot 303,16}}{3,541^2 \cdot 1,007} = 0,0000021 = 2,123 \cdot 10^{-6} \text{ O}_2 - \text{кислород}$$

$$\mu_8 = 0,27219 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{18,016 \cdot 303,16}}{2,641^2 \cdot 2,792} = 0,000001157 = 1,157 \cdot 10^{-6} \text{ Водяной пар}$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.10);

$$\begin{aligned} \mu_{см} &= 0,237 \cdot \sqrt{27,011} \cdot 0,000001839 + 0,002 \cdot \sqrt{30,068} \cdot 0,00000097 + 0,1 \cdot \sqrt{2,016} \cdot \\ &\cdot 0,000000911 + 0,17 \cdot \sqrt{44,011} \cdot 0,00000154 + 0,005 \cdot \sqrt{16,042} \cdot 0,00000115 + 0,485 \cdot \\ &\cdot \sqrt{28,016} \cdot 0,000001825 + 0,001 \cdot \sqrt{32} \cdot 0,0000021 + 0,042 \cdot \sqrt{18,016} \cdot 0,00000115 / \\ &/ (0,237 \cdot \sqrt{28,011} + 0,002 \cdot \sqrt{30,068} + 0,1 \cdot \sqrt{2,016} + 0,17 \cdot \sqrt{44,011} + 0,005 \cdot \sqrt{16,042} + \\ &+ 0,485 \cdot \sqrt{28,016} + 0,001 \cdot \sqrt{32} + 0,042 \cdot \sqrt{18,016}) = 0,0000023 + 0,00000001 + \\ &+ 0,000000129 + 0,000001736 + 0,000000023 + 0,00000468 + 0,000000011 + 0,0000002 / \\ &/ (1,254 + 0,01 + 0,142 + 1,128 + 0,02 + 2,567 + 0,006 + 0,178) = 0,0000091 / 5,305 = \\ &= 0,000001715 = 1,715 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

кгс/м²

Вязкость смеси при рабочей температуре и рабочем давлении определяется по формуле:

$$\mu = C_{\mu} \cdot \mu_{см}, \quad (3.17.13)$$

где C_{μ} – поправочный множитель, зависит от приведенных давления и температуры смеси $P_{ПП}$ и $T_{ПП}$

$$P_{ПП} = \frac{P}{P_{nk}} \quad (3.17.14)$$

$$T_{ПП} = \frac{T}{T_{nk}}, \quad (3.17.15)$$

где P_{nk} и T_{nk} – псевдокритические параметры смеси

$$P_{nk} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot P_{Ki}, \quad (3.17.16)$$

$$T_{nk} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot T_{Ki}, \quad (3.17.17)$$

где P_{Ki} и T_{Ki} – критические давление и температура i-того компонента;

$$\begin{aligned} T_{nk} &= 0,237 \cdot 132,96 + 0,002 \cdot 305,46 + 0,1 \cdot 33,26 + 0,17 \cdot 304,26 + 0,005 \cdot 190,66 + \\ &+ 0,485 \cdot 126,20 + 0,001 \cdot 154,80 + 0,042 \cdot 647,30 = 31,512 + 0,611 + 3,326 + 51,725 + \\ &+ 0,953 + 61,21 + 0,155 + 27,187 = 176,187 \end{aligned}$$

$$P_{ПП} = \frac{P}{P_{nk}} = \frac{1,034}{49,22} = 0,021$$

$$T_{\text{ПР}} = \frac{T}{T_{\text{нк}}} = \frac{303,16}{176,678} = 1,716$$

$$C_{\mu} = 1$$

Полученные данные подставим в формулу (3.17.13);

$$\mu = 1 \cdot 1,715 \cdot 10^{-6} = 1,715 \cdot 10^{-6}$$

Предельное значение расхода сухой части газа по шкале прибора $Q_{\text{НОМ.ПР}}$ определяется по формуле:

$$Q_{\text{НОМ.ПР}} = n_2 \cdot 10^4 \geq Q_{\text{НОМ.МАХ}}, (3.17.18)$$

где x – любое целое число (отрицательное, положительное или 0);

n_2 – выбирается из ряда: 1; 1.25; 1.6; 2; 2.5; 3.2; 4; 5; 6.3; 8;

Полученные данные подставим в формулу (3.17.18);

$$Q = 2,5 \cdot 10^5 \geq 250000$$

Числа Рейнольдса Re и $Re_{\text{ПР}}$ соответственно при среднем и предельном расходах определяются по формулам;

$$Re = 0,0361 \cdot \frac{Q_{\text{НОМ.СР}} \cdot \rho_{\text{НОМ}} \cdot \rho}{D \cdot \rho_{\text{С.Т}} \cdot \mu}, (3.17.19)$$

$$Re = 0,0361 \cdot \frac{80000 \cdot 1,18 \cdot 1,125}{2000 \cdot 1,715 \cdot 10^{-6} \cdot 1,094} = 1021692,67$$

$$Re = 0,0361 \cdot \frac{Q_{\text{НОМ.ПР}} \cdot \rho_{\text{НОМ}} \cdot \rho}{D \cdot \rho_{\text{С.Т}} \cdot \mu}, (3.17.20)$$

$$Re = 0,0361 \cdot \frac{250000 \cdot 1,18 \cdot 1,125}{2000 \cdot 1,094 \cdot 1,715 \cdot 10^{-6}} = 3192789,586$$

контур регулирования давление воздухонагреватель.

Определение параметров диафрагмы

Вспомогательная величина C определяется по формуле:

$$C = \frac{Q_{\text{НОМ.ПР}} \cdot T \cdot K \cdot \sqrt{\rho}}{3,553 \cdot D^2 \cdot (P - \varphi \cdot P_{\text{ВПмак}})}, (3.17.21)$$

$$C = \frac{250000 \cdot 303,16 \cdot 1 \cdot \sqrt{1,125}}{3,553 \cdot 2000 \cdot (1,034 - 1 \cdot 0,04325)} = 5,709$$

Определение предельного номинального перепада давления дифманометра ΔP_H и приближенного значения относительной площади отверстия диафрагмы m : $m=0.51$;

Проверка ограничения на число Рейнольдса:

$$Re_{\min} = 10^4; \text{ т.к. } 0.2 < m \leq 0.59$$

$$Re_{\min} > Re_{\min}; \text{ т.к. } 1021692,67 > 10000$$

Необходимая минимальная длина прямолинейного участка трубопровода определяется по формуле:

$$L_1 = \left(\frac{l_1}{D_2} \right) \cdot D_2 \cdot 10^{-3} \quad (3.17.22)$$

$$L_{\min} = L + L_2, \quad (3.17.23)$$

До сужающего устройства задвижка открывается $\frac{l_1}{D_2} = 20$. После сужающего устройства $\frac{l_1}{D_2} = 7,3$.

Полученные данные подставим в формулу (3.17.22);

$$L_1 = 20 \cdot 2000 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ м};$$

$$L_2 = 7,3 \cdot 2000 \cdot 10^{-3} = 14,6 \text{ м}$$

$$L_{\min} = L + L_2 = 40 + 14,6 = 54,6 \text{ м}; \text{ ПТ} = 60$$

Так как выполняется условие $60 > 54,6$, то расчет можно продолжать.

Коэффициент расхода определяется по формуле (3.17.24):

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \cdot \left(0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,184 \cdot m^4 + 0,0028 \cdot m^{1,25} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_{\text{пр}}} \right)^{0,75} \right) \cdot K_{\text{ш}} \cdot K_n, \quad (3.17.24)$$

где $K_{\text{ш}}$ - поправка на шероховатость трубопровода;

K_n – поправка на неостроту входной кромки диафрагмы;

Определение $K_{\text{ш}}$:

$$h = \frac{K}{D} \cdot 10^4; \quad (3.17.25)$$

$$h = \frac{0,22}{2000} \cdot 10^4 = 1,1$$

$$h_D = 3,9 + 10^3 e^{-14,2\bar{m}} \text{ при } m > 0,13$$

$$h_D = 3,9 + 10^3 \cdot 0,00000139 = 3,901$$

Если $h < h_D$, $11 < 3,901$ или $C = \frac{2000}{10^3} \geq 0,3$ то $K_{ш} = 1$

Определение $K_{ш} = 1$,

Полученные данные подставим в формулу (3.17.24);

Коэффициент расширения среды ε для предельного номинального перепада давления ΔP_H определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot m^2) \cdot \frac{\Delta P_n \cdot 10^{-4}}{P \cdot X} \quad (3.17.26)$$

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot 0,51^2) \cdot \frac{250 \cdot 10^{-4}}{1,034 \cdot 1,401} = 0,9915$$

Вспомогательная величина определяется по формуле:

$$(m\alpha)_1 = \frac{C}{\varepsilon \cdot \sqrt{\Delta P_m}} \quad (3.17.27)$$

$$(m\alpha)_1 = \frac{5,709}{0,99148248250} = 0,364$$

Точное значение относительной площади отверстия диафрагмы и коэффициента расширения определяется по формуле:

$$m_1 = \frac{(m\alpha)_1}{\alpha} \quad (3.17.28)$$

$$m_1 = \frac{0,364}{0,645} = 0,5646$$

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot 0,5646^2) \cdot \frac{250 \cdot 10^{-4}}{1,034 \cdot 1,401} = 0,991028$$

$$|\varepsilon_1 - \varepsilon| < 0,0005;$$

$$|0,991028 - 0,9934824| < 0,0005$$

$$m_1 = 0,5646$$

$$\varepsilon_1 = 0,991028$$

Диаметр отверстия диафрагмы при $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ определяется по формуле:

$$\alpha_{20} = \frac{D}{K_t} \cdot \sqrt{m} \quad (3.17.29)$$

$$\alpha_{20} = \frac{2000}{1} \cdot \sqrt{0,5646} = 1502,7979$$

Действительная потеря давления определяется по формуле:

$$P_n = \frac{1 - m\alpha}{1 + m\alpha} \cdot \Delta P_n \cdot 10^{-4} \quad (3.17.30)$$

$$P_n = \frac{1 - 0,5646 \cdot 0,645}{1 + 0,5646 \cdot 0,645} \cdot 0,025 = 0,0117 \text{ кгс/см}^2$$

Проверка расчета:

Расход, соответствующий предельному номинальному перепаду давления дифманометра определяется по формуле:

$$Q_{НОМ} = 0,01252 \alpha \cdot \varepsilon \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \frac{\sqrt{\Delta P_n \cdot \rho}}{\rho_{НОМ}} \quad (3.17.31)$$

$$Q_{Ш} = 3,533 \cdot 0,641 \cdot 0,991 \cdot 1^2 \cdot 1502,7979 \cdot \frac{1,034 - 1 \cdot 0,0325}{303,16 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{250}{1,125}} = 249760,5122$$

$$\delta = \left(\frac{Q_{НОМ}}{Q_{НОМПР}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3.17.32)$$

$$\delta = \left(\frac{249760,5497}{250000} - 1 \right) \cdot 100\% = -0,096$$

Так как $|\delta| < 0,2\%$, $|-0,096| < 0,2\%$, то расчет выполнен правильно.

3.18 Измерение уровня

Для измерения уровня жидкостей применяются специальные средства измерений – **уровнемеры**.

Многообразие типов уровнемеров, принцип действия которых основан на различных физических методах, объясняется разнообразием свойств измеряемых жидкостей. Наибольшее распространение в промышленном использовании получили следующие виды уровнемеров:

буйковые, пьезометрические, гидростатические, поплавковые, и ёмкостные.

Буйковый уровнемер – уровнемер, принцип действия которого основан на измерении перемещения буйка или силы гидростатического давления, действующей на буйёк.

Буйёк в отличие от поплавка не плавает на поверхности жидкости, а погружён в жидкость и перемещается в зависимости от её уровня. Буйковые уровнемеры наиболее часто применяются для измерения уровня однородных, в том числе агрессивных, жидкостей, находящихся при высоких рабочих давлениях (до 32 МПа), широком диапазоне температур (от –200 до +600 °С) и не обладающих свойствами адгезии (прилипания) к буйкам.

Главной особенностью буйковых уровнемеров является возможность измерения уровня границы раздела двух жидкостей.

Недостатком буйковых уровнемеров являются зависимость их точности от плотности и температуры измеряемой среды, ограниченность использования для больших (свыше 16 м) диапазонов измерения уровней жидкостей и жидкостей, обладающих адгезией к буйку.

Пьезометрический уровнемер – уровнемер, принцип действия которого основан на преобразовании гидростатического давления жидкости в давление воздуха, подаваемого от постороннего источника и барботирующего через слой жидкости.

У этого уровнемера чувствительный элемент не находится в непосредственном контакте с измеряемой средой, а воспринимает гидростатическое давление через воздух, что является его достоинством. Для пьезометрических уровнемеров также характерна погрешность измерения из-за изменения плотности измеряемой среды.

Гидростатический уровнемер – уровнемер, принцип действия которого основан на измерении манометром или напоромером

гидростатического давления жидкости, зависящего от высоты её уровня. Уровнемеры этого вида обычно используют для измерения неагрессивных, незагрязнённых жидкостей, находящихся под атмосферным давлением. Для измерения уровней агрессивных сред используют специальные разделительные устройства.

Недостатком гидростатических уровнемеров является погрешность измерения при изменении плотности жидкости.

Поплавковый уровнемер – уровнемер, принцип действия которого основан на измерении перемещения поплавка, плавающего на поверхности жидкости (поплавок как бы отслеживает уровень жидкости).

Поплавковые уровнемеры не пригодны для вязких жидкостей (дизельного топлива, мазута, смол) из-за залипания поплавка, обволакивания его вязкой средой. При измерении уровня криогенных жидкостей из-за кипения верхнего слоя возникает вибрация поплавка, что приводит к искажениям результатов измерения. Наиболее часто поплавковые уровнемеры используют для измерения уровней в больших открытых резервуарах, а также в закрытых резервуарах с низким давлением. Применение магнитной связи для передачи перемещения поплавка позволяет герметизировать вывод передачи в измерительный блок, упростить конструкцию, повысить надёжность, измерять уровень в резервуарах под давлением.

Ёмкостной уровнемер – уровнемер, принцип действия которого основан на различии диэлектрической проницаемости жидкости и воздуха. В связи с этим по мере погружения электродов датчика уровнемера в жидкость изменяется ёмкость между ними пропорционально уровню жидкости в резервуаре.

Менее распространены акустические, магнито-стрикционные, радиоизотопные, вибрационные уровнемеры.

Заключение

Электрические измерения повлияли на развитие науки и техники. Благодаря им стало возможно измерение любых величин и создание информационно-измерительных систем. Что в свою очередь повлияло на уровень автоматизации технологических процессов и производств.

Ведь контроль за основными технологическими параметрами производственного процесса невозможен без их измерения.

Материал, изложенный в учебном пособии, понадобится студентам для изучения таких дисциплин, как «Метрология, стандартизация и сертификация», «Электротехника и электроника» и «Технические измерения и приборы».

Список литературы

1. Архипов А.В., Берновский Ю.Н., Зекунов А.Г., Зубков Ю.П., Мишин В.М., Новиков В.А., Панов В.П. Основы стандартизации, метрологии и сертификации: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлениям стандартизации, сертификации и метрологии (200400), экономики (080100) и управления (080500). под ред. Мишина В.М. - Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. - 447 с.
4. Афанасьев, А.А. Физические основы измерений: учебник М.: Академия, 2010
5. Клименков, С. С. Нормирование точности и технические измерения в машиностроении [Электронный ресурс]: учебник - <https://e.lanbook.com/book/43874> Минск: Новое знание, 2013
6. Лесной, Б. В. Технические измерения и приборы [Электронный ресурс]: учебное пособие - <http://library.vstu.ru> Волгоград: ВолгГТУ, 2011
7. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация 3-е изд., испр. - Москва: Высшая школа, 2005. - 422 с.
8. Сергеев, А. Г., Метрология, стандартизация и сертификация: учебник М.: Юрайт, 2011
9. Сигов А.С., Нефедов В.И. Метрология, стандартизация и технические измерения Учебник для вузов. под ред. Сигова А.С. - Москва: Дашков и К, 2008. - 624 с.
10. Силаев, А.А, Силаева, Е.Ю. Основы технических измерений [Электронный ресурс]: методические указания - <http://library.volpi.ru> Волжский, 2016
11. Силаев, А.А., Силаева, Е.Ю. Основы технических измерений. Выполнение семестровой (контрольной) работы [Электронный ресурс]: методические указания - <http://library.volpi.ru> Волжский, 2016

12. Схиртладзе А.Г., Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация. - Старый Оскол: ТНТ, 2010. - 540 с.

13. Шевчук В. П., Капля В. И., Желтоногов А. П., Лясин Д. Н. Метрология интеллектуальных измерительных систем. под ред. Академика метрологической академии России, профессора Шевчука В.П. - Волгоград: ВолгГТУ, 2005. - 210 с.

Электронное учебное пособие

Алексей Александрович **Силаев**
Елена Юрьевна **Силаева**

Основы технических измерений

Учебное пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2018 г. Поз. № 42.
Подписано к использованию 08.10.2018. Формат 60x84 1/16.
Гарнитура Times. Усл. печ. л. 4,94.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.