

Требования к выполнению отчета

1. Отчет по лабораторной работе выполняется в отдельной тетради и должен содержать:
2. Название лабораторной работы, ее цель, задачи.
3. Вариант задания.
4. Рисунок структуры лабораторной установки.
5. Таблицу с результатами измерений интервалов времени вычисленными погрешностями измерения.

Вопросы для самопроверки

1. Привести основные формулы для магнитных величин.
2. Рассказать принцип действия установки для снятия петель гистерезиса.
3. Описать погрешности применяемых приборов.
4. Как определить основную кривую намагничивания материала образца?
5. Как определить потери в магнитном сердечнике при намагничивании?

Библиографический список

1. Фремке, А.В. Электрические измерения. / А.В. Фремке. — Л : Энергия, 1973. — 424 с.
2. Кифер, Н.И. Характеристики ферромагнитных сердечников / Н.И. Кифер. — М. : Энергия, 1973. — 424 с

**Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Автоматизация технологических процессов и
производств»**

В.И. Дягилев, В.А. Коковин

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ»

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано
кафедрой автоматизации технологических процессов и производств
филиала «Протвино» государственного университета «Дубна»
в качестве методического пособия для студентов,
обучающихся по направлению
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Протвино
2016

ББК 30.10я73
Д99

Рецензент:

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Транспортные средства и бортовые информационно-управляющие системы»
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»
А.В. Меркулов

Д99 **Дягилев, В.И.**
Лабораторные работы по дисциплине «Технические измерения и приборы»: электронное методическое пособие / В.И. Дягилев, В.А. Коковин. — Протвино, 2016. — 60 с.

Методическое пособие содержит описание четырех лабораторных работ и предназначено для изучения принципа действия и устройства приборов контроля основных параметров технологических процессов: интервалов времени, давления, температуры, магнитных свойств материалов.

Методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

ББК 30.10я73

©Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2016
© Дягилев В.И., Коковин В.А., 2016

Табл. 4.1. Данные измерений

№ опыта	U верт, В	Uгор, В	Масштабы		В, Тл	H, А/м
				$m_{гор}$		
1						
2						
3						

По данным измерений построить график основной петли намагничивания.

Пример графика основной петли намагничивания представлен на рис. 4.5.

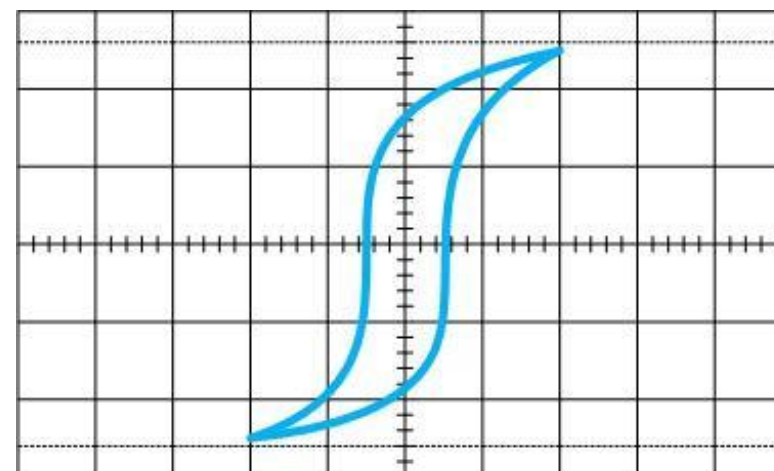


Рис. 4.5. График основной петли гистерезиса

Методические указания

1. Рекомендуется повышать напряжение на входе плавно, начиная с нуля.
2. Зафиксировать 5-6 значений тока намагничивания, то есть зарисовать 5-6 петель гистерезиса с экрана осциллографа.
3. Расчеты производить в общепринятых единицах СИ.

$$U_c = \int i dt \approx \frac{1}{RC} \int e dt = \frac{w}{RC^2} SB,$$

Исходя из того, что $i_c = C \frac{dU}{dt}$

Исследуемые сигналы подаются на горизонтальные и вертикальные пластины осциллографа через усилители (согласно рис. 3). При этом на экране получают изображение петли гистерезиса, величина которой определяется намагничивающим током:

$$H_m = \frac{m_{гор} \cdot w_1}{R \cdot l_{ном}} \alpha_H \quad B_m = \frac{m_{верт} \cdot RC}{w_2 \cdot S} \alpha_B$$

где α_H и α_B — значение H и B, полученные из осциллограмм, $m_{гор}$ и $m_{верт}$ — масштабы по горизонтали и вертикали, S — площадь поперечного сечения испытуемого образца, w_1 — число витков первичной обмотки испытуемого образца, w_2 — число витков вторичной обмотки испытуемого образца.

$$m_{гор} = \frac{2\sqrt{2}U_1}{l_{гор}} \quad m_{верт} = \frac{2\sqrt{2}U_c}{l_{верт}}$$

4.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Включить регулятор напряжения в сеть. Установить с его помощью необходимую величину тока намагничивания (напряжение магнитного поля Hм и индуктивности поля Bм). Таким образом на экране осциллографа можно наблюдать разные по величине петли гистерезиса. По их конечным точкам определяется основная кривая намагничивания.

Данные измерения занести в табл. 4.1.

Оглавление

Введение	5
Некоторые сведения об измерениях и определении погрешности измерения	5
Лабораторная работа № 1. Измерение интервалов времени	9
1.1 Краткие сведения из теории	9
1.1.1 Метод заряда и разряда конденсатора.....	10
1.1.2 Нониусный метод	10
1.1.3 Метод цифровых линий задержек	11
1.1.4 Интерполяционный метод	12
1.1.5 Численно-импульсный метод (метод дискретного счета)	13
1.2 Состав оборудования и подготовка его к работе.....	18
1.3 Порядок выполнения лабораторной работы	20
Библиографический список	22
Лабораторная работа № 2. Измерение давления	23
2.1 Краткие сведения из теории	23
2.1.1 Виды измеряемых давлений	23
2.1.2 Классификация приборов для измерения давления	24
2.1.3 Деформационные датчики давления	27
2.1.4 Электрические датчики давления	29
2.2 Состав оборудования и подготовка его к работе.....	33
2.3 Порядок выполнения лабораторной работы	35
Библиографический список	37

Лабораторная работа № 3. Исследование датчиков температуры.....	38
3.1 Краткие сведения из теории	38
3.1.1 Контактные методы и средства измерений.....	39
3.1.2 Термометры сопротивления	41
3.1.3 Термопары.....	43
3.1.4 Термисторы.....	47
3.1.5 Интегральные полупроводниковые датчики	47
3.2 Состав оборудования и подготовка его к работе.....	48
3.3 Порядок выполнения лабораторной работы	49
3.4. Выводы	50
Библиографический список.....	50
Лабораторная работа № 4. Исследование магнитных материалов. Осциллографический метод наблюдения петли гистерезиса и измерение ее параметров	52
4.1 Краткие сведения из теории	52
4.1.1 Основные характеристики магнитных материалов	53
4.2 Состав оборудования и подготовка его к работе.....	56
4.3 Порядок выполнения лабораторной работы	58
Библиографический список.....	60

Если напряжение, снимаемое с пункта $R_{ш}$ мало, можно применить операционный усилитель с отрицательной обратной связью (ООС).

При этом $K_{ус} = -\frac{R_2}{R_1}$ (рис. 4.4).

Для определения потерь на гистерезисе и вихревые токи можно включить в цепь намагничивания ваттметр (клеммы 1, 2 и 3)

Испытуемый образец представляет собой тор из стальной ленты (прямоугольного сечения) с намотанными на него двумя обмотками — измерительной и намагничивающей.

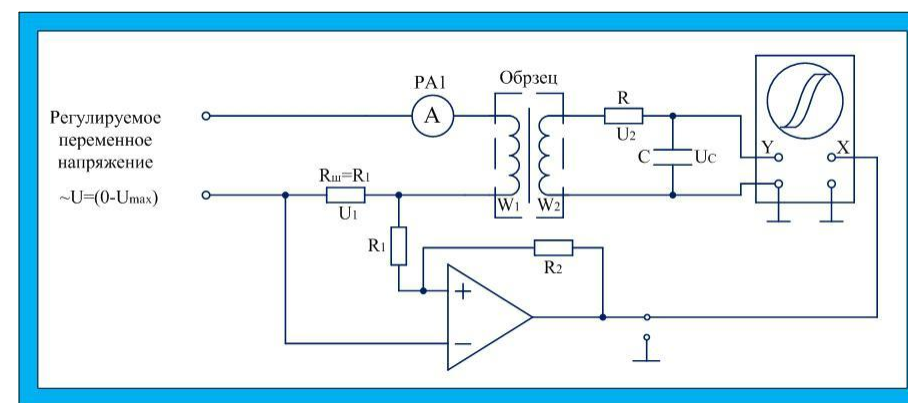


Рис. 4.4. Схема включения операционного усилителя

В цепь намагничивающей обмотки включен резистор, величина которого должна быть намного меньше величины реактивного сопротивления этой обмотки.

Со вторичной обмотки (измерительной) снимается напряжение U_2 и подается на интегрирующую цепочку RC. Для точного интегрирования $R \gg x_c$ (ток i_c определяется величиной R). Тогда по закону электромагнитной индукции

$$e_2 = -w_2 \frac{dB}{dt}$$

После интегрирования получаем

Динамические петли гистерезиса (вернее, их семейство) испытуемого материала дают наиболее полную его характеристику [2], так как по ним можно определить амплитуду индукции при заданном токе намагничивания, остаточную индукцию, коэрцитивную силу, индукцию насыщения, потери в сердечнике на гистерезис.

Самый удобный способ определения таких параметров — это осциллографический метод исследования динамических петель гистерезиса и дальнейший расчет по электрическим данным магнитных характеристик.

4.2 Состав оборудования и подготовка его к работе

При «осциллографическом методе» снятия петель гистерезиса большое значение имеет точность всех компонентов опытной установки, схема которой показана на рис.4.3

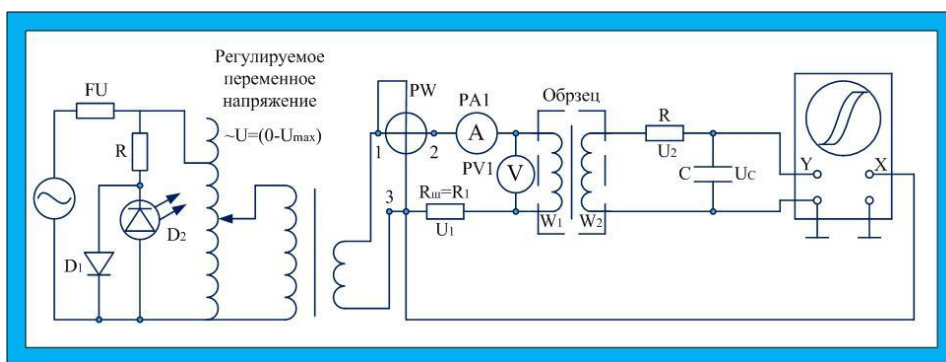


Рис. 4.3. Схема опытной установки

К сети переменного напряжения 220В подключен через предохранитель FU автотрансформатор типа ЛАТР-0,5-220, к выходу которого присоединен понижающий трансформатор (ТН-61-220-50). К его вторичной обмотке через амперметр и безиндуктивный резистор подключена намагничивающая обмотка испытуемого ферромагнитного образца.

Введение

Высокопроизводительная, экономичная и безопасная работа технологических процессов требует применения современных методов и средств измерения величин, характеризующих ход производственного процесса и состояние оборудования. Автоматический контроль является логически первой ступенью автоматизации, без успешного функционирования которых невозможно создание эффективных автоматизированных систем.

Некоторые сведения об измерениях и определении погрешности измерения

Датчик (sensor-англ.) — это первичный преобразователь контролируемой величины в выходной сигнал, как правило, электрический. Поэтому при использовании датчиков применяют различные электрические и электронные устройства — блоки питания, усилители, мостовые измерительные схемы, измерительные приборы, как электромеханические, так и цифровые.

Все это вместе взятое, а так же свойства самих датчиков приводят при измерении первичного сигнала к возникновению погрешностей преобразования.

Вообще, провести измерение это значит установить, сколько раз в измеряемой величине укладывается величина измерения.

Абсолютно точных измерений сделать нельзя. Каждый раз, выполняя измерение, мы получаем результат, более или менее близкий к «истинному значению» измеряемой величины. Мера этого отклонения называют ошибкой или погрешностью измерения.

Источники наиболее типичных ошибок можно классифицировать следующим образом.

- **Грубые ошибки или промахи** обычно появляются в результате небрежной или низкой квалификации персонала, проводящего измерения, при использовании неисправного измерительного устройства, при резком нарушении условий проведения измерений. Грубые ошибки, как правило, приводят к значительным отклонениям от точного значения измеряемой величины.

- **Личные ошибки** зависят от индивидуальных особенностей измерителя — остроты зрения, глазомера, скорости реакции, а так же от степени утомления в момент проведения измерений.

- **Инструментальные (приборные) ошибки** возникают из-за того, что ни одно измерительное устройство не может быть изготовлено абсолютно точно.

- **Ошибки обработки.** Эти ошибки порождаются различными аппроксимациями, окружениями, не учетом различных факторов, влияющих на результат обработки.

- **Ошибки модели.** Если привязать на нить, длины L маленький шарик и измерить период T его колебаний, то ускорение свободного падения можно определить по формуле

Систематические и случайные ошибки

Хотя понятия систематической и случайной погрешности важны, граница между ними не определена. Поэтому начнем с примера.

Если многократные измерения периода колебаний маятника выполнены с использованием часов (секундомера), которые спешат или отстают, то полученный результат неизбежно содержит систематическую погрешность, связанного с инструментальной ошибкой измерительного устройства.

Анализируя приведенный пример, можно заключить, что погрешность результата, полученного в данной серии измерений, мы рассматриваем как систематическую погрешность, если она во всей серии занижает или завышает истинное значение приблизительно на одну и ту же величину.

Из опыта мы знаем, что при проведении серии измерений одной и той же величины мы почти всегда получаем разные результаты. При анализе таких измерений вводят понятие среднего значения.

Если при проведении N измерений получены результаты — $x_1, x_2, \dots, x_n$, то средним значением измеренной величины называется:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Причиной хаотического разброса отдельных измерений вокруг среднего значения мы считаем случайные ошибки. Отклонения слу-

По предельной петле гистерезиса можно найти максимальные значения индукции $B_{\max}$ и напряженности $H_{\max}$, а также остаточную

индукцию B_r и коэрцитивную силу H_c , то есть напряженность поля, при которой $B = 0$.

По виду основной кривой намагничивания и петли гистерезиса, а также по значениям $B_{\max}$, $H_{\max}$, B_r и H_c можно судить о свойствах

данного магнитного материала и области его практического применения.

Материалы с узкой петлей гистерезиса и большим значением B_r , являющиеся магнитомягкими, целесообразно применять, например, для изготовления магнитопроводов измерительных механизмов, у которых рабочее магнитное поле создается измеряемым током. Это уменьшит погрешности из-за гистерезиса и нелинейности кривой намагничивания.

Ферромагнитные материалы находят исключительно широкое применение в современной технике (сердечники электрических машин, трансформаторов, дросселей и т.п.). Они работают в самых разнообразных условиях намагничивания и перемагничивания: в постоянных и переменных магнитных полях. Это накладывает высокие требования к применяемым материалам. Для правильного использования ферромагнитных материалов необходимо знать их основные характеристики [1].

В большинстве случаев при определении характеристик магнитных полей и материалов магнитные величины рассчитывают по полученным экспериментальным значениям электрических величин.

Магнитные характеристики принято разделять на статические и динамические.

Первые определяют в постоянных и квазипостоянных магнитных полях.

Динамические характеристики магнитных материалов измеряют в переменных и импульсных магнитных полях тогда они зависят не только от свойств материала (как статические), но и от частоты и формы намагничивающего тока от размеров испытуемого образца.

Важнейшими магнитными характеристиками являются основная кривая намагничивания и симметричная предельная петля гистерезиса.

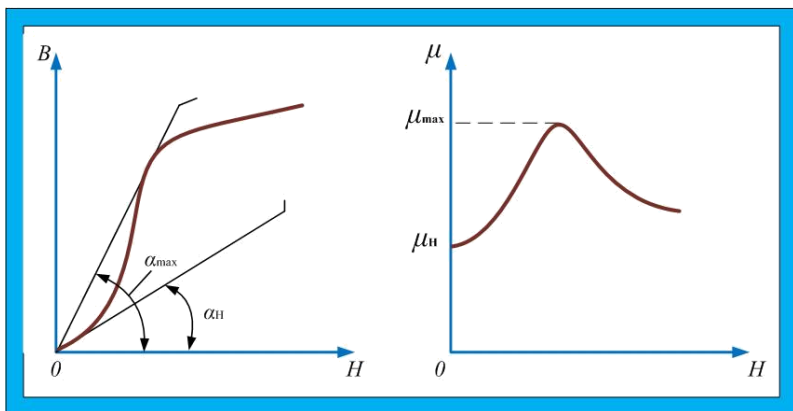


Рис.4.1. Зависимость магнитной индукции от напряжения магнитного поля

На практике пользуются основной кривой намагничивания, которая является геометрическим местом вершин семейства симметричных петель гистерезиса (рис. 4.2).

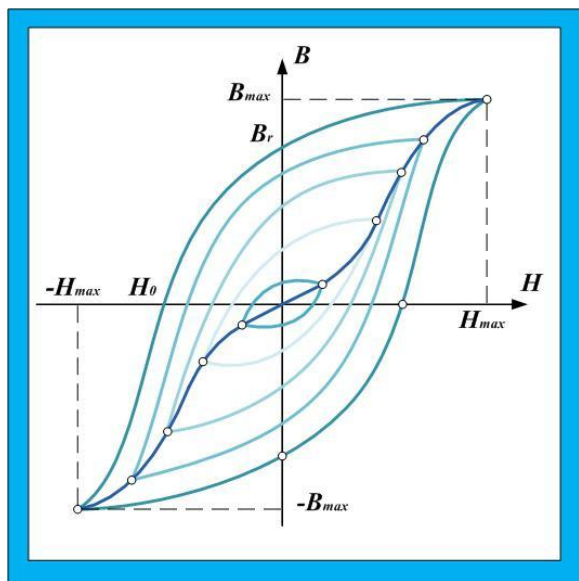


Рис. 4.2 Основная кривая намагничивания

чайной величины от среднего значения называются также **флуктуациями** случайной величины.

Абсолютная и относительная ошибки

Абсолютной ошибкой (абсолютной погрешностью) измерения называется разность между истинным (x_0) и измеренным (x) значениями

$$\Delta x = x_0 - x$$

При реальных ситуациях истинное значение величины никогда не известно. Поэтому абсолютной погрешностью i -го измерения называют разность между средним значением измерения и результатом i -го измерения

$$\Delta x_i = \bar{x} - x_i,$$

Относительной ошибкой (относительной погрешностью) i -го измерения называют отношение

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}}$$

Если ε_i выражается в процентах, то $\varepsilon_i = \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100\%$.

Абсолютная ошибка всегда указывает, когда приводятся результаты измерений конкретных величин. Например, ускорения свободного падения, плотности некоторого вещества, и т.п.

Относительная ошибка чаще используется при сравнении различных методов измерения одной и той же величины, то есть является мерой точности метода.

Погрешность прямого измерения

Пусть в результате проведения в одних и тех же условиях прямых измерений некоторой величины X получены N результатов — $x_1, x_2, \dots, x_n$. Предположим, что систематические погрешности отсутствуют или их удалось исключить. Тогда наилучшей оценкой истинного значения величины X является среднее значение, которое мы определили

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

8

Эту величину иногда называют также **выборочным средним**.

За количественную меру разброса отдельных измерений принимается величина

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

называемая **выборочной дисперсией** (часто говорят просто дисперсией) измерений. Величина s т.е. квадратный корень из дисперсии, называется стандартным отклонением (стандартной ошибкой, среднеквадратичным отклонением, среднеквадратичной ошибкой). Стандартное отклонение характеризует качество некоторого «среднего» измерения, оно показывает, насколько сильно разбросаны отдельные измерения вокруг среднего значения.

За абсолютную случайную погрешность Δx среднего значения мы будем принимать величину

$$\Delta x = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{N}}$$

Окончательный результат обработки записывается в форме $x = \bar{x} \pm \Delta x$

Погрешность косвенных измерений

Пусть величина Y , подлежащая измерению, является известной функцией переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$, т.е. $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Величины $x_1, x_2, \dots, x_n$ измерены и для каждой из них известны средние значения и их погрешности $\bar{x}_i \pm \Delta x_i$. Тогда за наилучшую оценку Y принимается значение $y = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$, а погрешность находят по формуле

$$\Delta y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right)^2$$

где частные производные вычислены в точке $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$. Окончательный результат записывается в виде $Y = \bar{y} \pm \Delta y$.

Динамические характеристики магнитных материалов измеряют в переменных магнитных полях. Последние зависят не только от свойств образца, но и от частоты магнитного поля, формы кривой поля, формы и размеров образца и лишь условно могут быть названы характеристиками материала.

4.1.1 Основные характеристики магнитных материалов

Наибольшее распространение на практике, а также в научных исследованиях получили ферромагнитные и ферримагнитные материалы (ферриты), отличающиеся от других материалов сильно выраженными магнитными свойствами. Все магнитные материалы принято подразделять на магнитомягкие и магнитотвердые. Магнитомягкие материалы легко намагничиваются и легко размагничиваются, а магнитотвердые — наоборот.

Для сравнения свойств различных магнитных материалов, а также для расчета устройств, содержащих магнитные цепи, необходимо знать магнитные характеристики этих материалов.

Важнейшими статистическими характеристиками являются основная кривая намагничивания и симметричная предельная (наибольшая) петля гистерезиса. Основная кривая намагничивания представляет собой зависимость магнитной индукции от напряжения магнитного поля $B = f(H)$ полученную на предварительно размагниченном образце (рис.4.1).

По основной кривой намагничивания можно определить магнитные проницаемости $\mu = B / \mu_0 H$ для различных значений H . Начальный участок кривой соответствует области начальной магнитной проницаемости $\mu_n = \lim_{H \rightarrow 0} (B / \mu_0 H)$, которая графически определяется

как $\tan \alpha_n$. Аналогично может быть найдена максимальная магнитная

проницаемость $\mu_{\max} = \tan \alpha_{\max}$

Зависимость $\mu = f(H)$ показана на рис.4.1

Лабораторная работа № 4.

Исследование магнитных материалов. Осциллографический метод наблюдения петли гистерезиса и измерение ее параметров

Цель работы: Получение динамических петель гистерезиса реальных магнитных образцов и измерение их параметров. Ознакомление с устройством установки. Исследование двух образцов магнитных материалов. Снятие петель гистерезиса и измерение их параметров.

4.1 Краткие сведения из теории

Электрические и магнитные измерения находятся в тесной связи друг с другом. Эта связь — следствие единства электрических и магнитных явлений.

Магнитные измерения дополняют электрические. Посредством магнитных измерений решается ряд задач, к которым относятся исследование магнитных свойств веществ и материалов, исследование различного рода электромагнитных механизмов, аппаратов и машин для выявления распределения магнитных потоков и МДС, контроль качества магнитных материалов и изделий из них в производственных условиях, испытание постоянных магнитов и электромагнитов и измерение полей, создаваемых ими, исследование магнитного поля Земли, изучение физических свойств материалов по их магнитным характеристикам.

В большинстве случаев при определении характеристик полей и материалов магнитные величины рассчитывают по полученным экспериментальным значениям электрических величин или электрических параметров.

Магнитные характеристики принято разделять на статические и динамические.

Статические характеристики магнитных материалов определяют в постоянных магнитных полях и используют как для расчета устройств, где эти материалы работают в таких же условиях, так и для сравнения одних материалов с другими.

Лабораторная работа № 1.

Измерение интервалов времени

Цель работы: изучение методов измерения интервалов времени и оценка погрешностей измерения.

1.1 Краткие сведения из теории

Важнейшей характеристикой любого производственного процесса, кроме затрат энергии и объемов перерабатываемой информации, является время. Затраты времени, как то было отмечено выше, — важнейшая исходная величина для определения не только объема выпуска продукции, но и характеристик производственной мощности объекта технического перевооружения или реконструкции.

Высокопроизводительная, экономичная и безопасная работа технологических процессов требует применения современных методов и средств измерения величин, характеризующих ход производственного процесса и состояние оборудования. Автоматический контроль является логически первой ступенью автоматизации, без успешного функционирования которых невозможно создание эффективных автоматизированных систем.

Известно несколько принципиально разных методов измерения ИВ. Каждый из них имеет свой предел точности, диапазон измерений, свои достоинства и недостатки с точки зрения практической реализации. При выборе метода измерения необходимо учитывать следующие параметры:

- диапазон измерений t_{MR} ;
- разрешающая способность δt_{LSB} ;
- «мертвое» время t_{DT} (минимальное время между сигналом «Стоп» и следующим сигналом «Старт»);
- длительность стартового и стопового импульсов t_{Cmapm} и t_{Cmon} .

Диапазон измерений может меняться от нескольких наносекунд при измерении быстро протекающих процессов (например, при фундаментальных исследованиях в физике высоких энергий) [1] до нескольких секунд (например, при измерении параметров медленно протекающих тепловых процессов). Величина разрешающей способ-

ности δt_{LSB} определяется весом младшего разряда измерителя LSB (least significant bit) и соответствует точности прибора. Величины t_{MR} и δt_{LSB} являются взаимозависимыми и определяются разрядностью внутреннего регистра измерителя ИВ. Поэтому при выборе в пользу того или иного метода измерения ИВ, в первую очередь, необходимо обращать внимание на требования к параметрам t_{MR} и δt_{LSB} , а также на тип задач, для которых используется измеритель ИВ. Величина t_{DT} — это минимальный интервал времени, необходимый для обработки информации перед последующим измерением. Длительность стартового и стопового импульсов (t_{Cmapm} и t_{Cmon}) должна быть как можно меньше и соизмерима с величиной разрешающей способности. Кратко проанализируем некоторые из существующих методов измерения ИВ.

Рассмотрим различные методы измерения интервалов времени.

1.1.1 Метод заряда и разряда конденсатора

Суть этого метода состоит в том, что длительность измеряемого интервала «растягивается» в определенное число раз с помощью «быстрого» заряда и последующего «медленного» разряда конденсатора [2]. Измерение осуществляется в два этапа преобразований. На первом этапе время преобразуется в аналоговую величину (напряжение) — ТАС (Time to Analog Converter), а на втором — аналоговая величина преобразуется в цифровой код при помощи АЦП. Коэффициент растяжения интервала времени вычисляется по формуле: $K = (I_1 - I_2)/I_2$ (I_1 — ток заряда, I_2 — ток разряда), причем $I_2 \ll I_1$. «Растянутый» интервал измеряется, как правило, численно-импульсным методом. Согласно этому методу разрешающая способность соответствует величине: $\delta t_{LSB} = T_0/(K+1)$. Быстродействие электронных компонент существенным образом влияет на основные характеристики и ограничивает предельные значения. Так в работе [3] представлен измеритель ИВ, базирующийся на этом методе, с основными параметрами: $\delta t_{LSB} = 200 \text{ нс}$ и $t_{MR} = 200 \text{ нс}$.

1.1.2 Нониусный метод

При измерении интервала времени по методу верньерной интерполяции (нониусный метод [4]) используется два опорных генератора с частотами $f_1 = 1/T_1$ и $f_2 = 1/T_2$. Причем частоты отличаются не

3.4 Выводы

1. Получены зависимости сопротивлений и ЭДС испытываемых датчиков от температуры.
2. Определены погрешности измерений.
3. По этим зависимостям можно определить достоверность показаний датчиков, сравнивая их с эталонными.

Требования к выполнению отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в отдельной тетради и должен содержать:

- название лабораторной работы, ее цель, задачи;
- вариант задания;
- рисунок структуры лабораторной установки для градуировки термодатчиков;
- таблицу с результатами измерений, вычисленными погрешностями измерения.

Вопросы для самопроверки

1. Дать определение понятию «температура».
2. Способы измерения температуры.
3. Средства измерения температуры (примеры).
4. Погрешности при измерениях температуры.
5. Определение и минимизация погрешности.

Библиографический список

1. Панфилов, В.А. Электрические измерения.— 4-е изд., стер. / В.А. Панфилов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 288 с.
2. Паспорт и инструкция по эксплуатации лабораторной установки «Измерение температуры».

В сосуд с водой В.С. и нагревателем Н погружаются три датчика Д1, Д2, Д3. Нагреватель Н подключается к блоку питания (БП), а выходы датчиков Д1, Д2 подключаются к измерительным приборам — мультиметрам ММ1 и ММ2 соответственно.

1. В ходе опыта, при нагревании воды до 80°C, фиксируется значение температуры индикатора цифрового термометра Д3. Одновременно фиксируются показания на приборе ММ1 (Омы) и на ММ2 (мВ). Текущие показания заносятся в табл. 1, приведенную ниже. Измерения провести в диапазоне от 0°C до 80°C, фиксируя заданное преподавателем количество точек.

2. По данным табл. 1 для датчиков Д1 и Д2 строятся зависимости температуры от сопротивления (датчик Д1) и от напряжения (датчик Д2).

3. Определить погрешности T_1 и T_2 измерений датчиками Д1 и Д2. Для этого необходимо сравнить полученные данные с градуировочными зависимостями, приведенными в паспортах на соответствующие датчики. Полученные значения занести в табл. 3.2.

Таблица 3.3 Результаты измерений

N п/п	Д1 (Ом)	Д2 (мВ)	Д3 (°C)	T1	T2
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

венно. Сигнал *Старт* запускает первый генератор, а сигнал *Стоп* разрешает работать второму генератору. Быстродействующая схема следит за тем, когда произойдет совпадение фаз обоих генераторов. С помощью специальных счетчиков подсчитывается число импульсов n на каждом из генераторов до моментов совпадения фаз (n_1 и n_2 , соответственно для каждого генератора). Эти числа используются для вычисления величины измеряемого интервала времени: $t_x = |(n_1 - 1)T_1 - (n_2 - 1)T_2|$. Разрешающая способность δt_{LSB} измерения ИВ этим методом равна $|T_1 - T_2|$.

Метод верньерной интерполяции при использовании современной элементной базы может обеспечить точность измерений примерно в 100 пс [4].

1.1.3 Метод цифровых линий задержек

Значительно более высокой точности удастся достичь путем применения метода цифровых линий задержек. Этот принцип измерения ИВ был сформулирован в работе [5], а затем доработан и применен в разработках TDC (Time to Digital Converter) в Европейском центре ядерных исследований (CERN) [6].

Использование внутренней распространяющейся задержки сигнала является основой метода, при этом величина линии задержки соответствует минимальному кванту измерений, то есть является величиной временного разрешения. Предлагаются различные конфигурации цепочек линий задержек [10]. Обычно это набор триггеров, которые последовательно переключаются по мере распространения стартового импульса. После подачи импульса *Стоп* процесс переключений останавливается, производится считывание состояния триггеров и рассчитывается длительность интервала времени. При современной технологии такие линии задержек легко реализовывать в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). При использовании такой структуры возникает ряд проблем: сильное влияние температуры и питающего напряжения на значения линий задержек и соответственно на значения измерений; требуется высокая стабильность задающей серии импульсов; уменьшается диапазон измерений.

1.1.4 Интерполяционный метод

Этот метод используется, когда требуется высокое разрешение при относительно большом диапазоне измерений. Измеряемый интервал времени разбивается на три отрезка. С помощью метода цифровых линий задержек измеряется начальный промежуток интервала времени (вблизи сигнала *Старт*) и конечный (в районе сигнала *Стоп*). А интервал времени, соответствующий полным циклам основной серии импульсов между сигналами *Старт* и *Стоп*, измеряется численно-импульсным методом. Идеи интерполяционного метода, предложенные в работе [4], затем были доработаны под современные технологии в [5].

Современные КМОП технологии позволили создать TDC на одном кристалле с интерполятором и цепочкой линий задержек. Такие TDC отличаются высокой разрешающей способностью (до 10 пс), широким диапазоном измерений (сотни микросекунд), слабой температурной зависимостью, невысокой требовательностью к источникам питания и низкой ценой. Для преодоления проблемы, связанной с влиянием температуры, напряжения и частоты на параметры элементов задержки, в схему введен специальный узел, предназначенный для постоянного контроля. Этой цели служит устройство фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), которое контролирует отклонение параметров от калиброванных значений.

В TDC используется интерполятор накопленных данных [6], который позволяет уточнить результат измерения интервалов времени. Например, интерполятор имеет n -разрядное число входов, на которые поступает внешний тактовый сигнал, сдвинутый на величину задержки. Тактовый сигнал поступает на второй вход интерполятора с задержкой t , а на третий вход с задержкой $2 \cdot t$, то есть время поступления сигнала на i -вход равно $(i - 1) \cdot t$. Таким образом, на входах интерполятора устанавливаются сдвинутые во времени импульсы тактового сигнала. При появлении стопового импульса входные данные запоминаются во внутренних регистрах. В результате получаем двоичный код, несущий уточняющую информацию о моменте прихода импульса *Стоп*.

В работах [7] представлены различные способы аппаратной реализации измерителей ИВ, базирующихся на микросхемах TDC.

- нагреватель представляет собой нихромовую спираль, размещенную на дне сосуда с водой;

- сосуд для проведения опытов изготовлен из нержавеющей стали, теплоизолирован и имеет размеры 250x150x160 мм;

- ММ1 и ММ2 — измерительные приборы типа В7-38.

Градуировочные характеристики датчиков Д1 и Д2 приведены в Паспорте лабораторной установки.

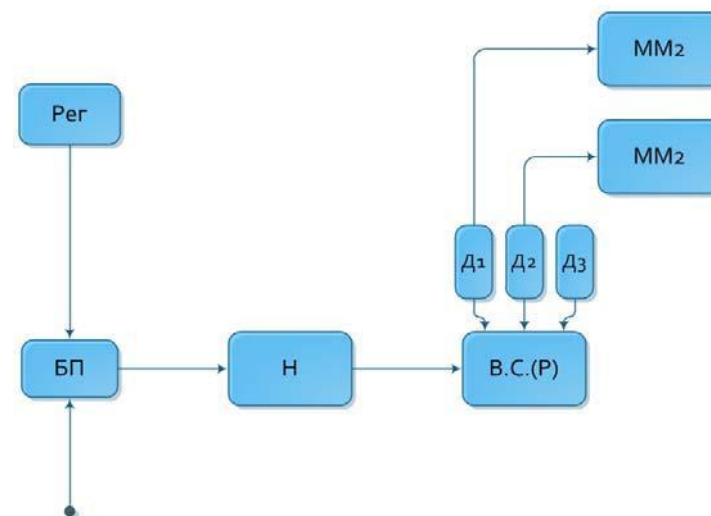


Рис. 3.7. Блок-схема для градуировки термодатчиков

3.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Произвести испытания датчиков температуры при нагреве жидко-сти (воды)
2. Сверить показания испытуемых датчиков с эталонным датчиком.
3. Произвести анализ погрешностей измерений.
4. Сделать выводы.

До начала проведения лабораторной работы необходимо ознакомиться с настоящим описанием и Паспортом лабораторной установки.

ровой код. Типичная чувствительность таких датчиков обычно составляет 1 мкА/°С.

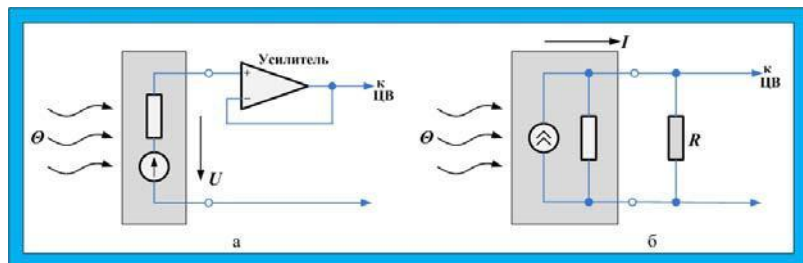


Рис. 3.6. Подключение интегральных полупроводниковых датчиков: а — напряжения, б — тока

3.2 Состав оборудования и подготовка его к работе

Блок-схема установки приведена на рис. 3.7:

- В.С.(Р) — сосуд с водой или нагреваемый радиатор для проверки термодатчиков;

- Д1, Д2, Д3 — термодатчики;

- М.М1, М.М.2 — мультиметры;

- БП — блок питания;

- Н — нагреватель;

- Рег. — регулятор степени нагрева.

В состав лабораторной установки входят следующие комплектующие:

- термодатчик Д1 резистивный медный ТСМ-08879, имеющий линейную градуировочную зависимость $R(T^{\circ}\text{C})$. При температуре 0°С его сопротивление равно 50 Ом;

- термодатчик Д2 — это термопара типа ТП — L.124 — 0040/1,5 К (– 40...400°С);

- термодатчик Д3 — это многофункциональный цифровой термометр типа ART-07761 с точностью измерения 0,1°С (–50...+200);

- блок питания с регулятором предназначен для электропитания нагревателя большим током при низком напряжении (20А х 5В). Входное напряжение 220 В;

1.1.5 Численно-импульсный метод (метод дискретного счета)

Простейшим и вместе с тем самым надежным, а поэтому и самым распространенным способом измерения ИВ, является численно-импульсный метод или метод дискретного счета [1]. Измерение заключается в сравнении измеряемого интервала времени t_x с дискретным интервалом, воспроизводящим образцовую единицу времени. Для этого измеряемый интервал t_x заполняется счетными импульсами с известным образцовым периодом следования $T_{сч}$, при этом $T_{сч} \ll t_x$. На рис.1.1 изображен интервал t_x , заполненный счетными импульсами.

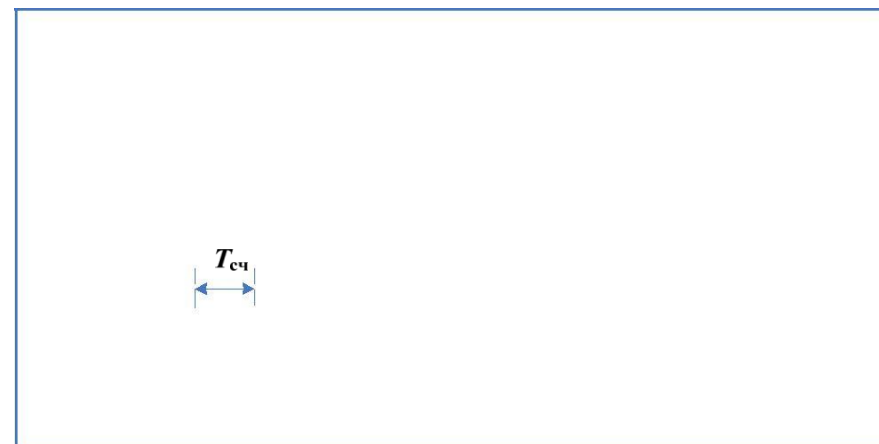


Рис. 1.1. Измерение временного интервала методом дискретного счета

Рассмотрим более подробно структурную схему измерителя и погрешности измерения при этом методе. Для аппаратной реализации этого метода необходимо использовать генератор счетных импульсов, счетчик импульсов и устройство, которое управляет прохождением импульсов из генератора в счетчик за интервал времени t_x (временные ворота). На рис. 1.2 показана структура такого измерителя. Временными воротами в электронике принято называть импульс, длительность которого равна измеряемому интервалу, то есть интервалу между двумя сигналами: *Старт* и *Стоп*. Таким образом, в счетчик проходят только те импульсы, которые попадают во временные воро-

та. Логический элемент И (конъюнкция &) выполняет функцию временного селектора.

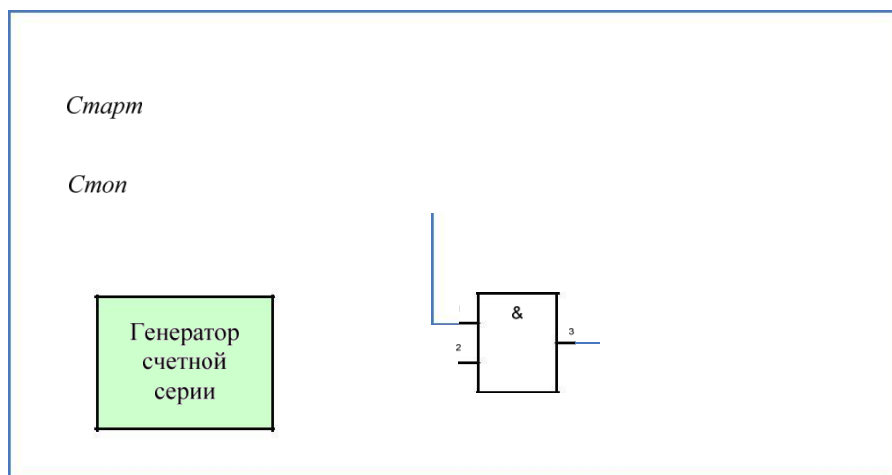


Рис. 1.2. Структура измерителя временных интервалов

Если период следования счетных импульсов генератора $T_{сч}$ (частота следования $F_{сч}$), то за интервал t_x через временные ворота пройдет импульсов m , следовательно, измеряемый интервал.

$$m = t_x / T_{сч} = t_x F_{сч} \quad (1.1)$$

$$t_x = m T_{сч} = m / F_{сч}. \quad (1.2)$$

Таким же образом можно измерить длительность прямоугольного импульса, при этом исследуемый импульс подается прямо на вход 1 элемента И.

Проанализируем погрешности измерения рассмотренным методом. В схеме, приведенной на рис. 1.2 мерой служит генератор счетных импульсов, следовательно, *погрешность меры* в этом случае — это нестабильность частоты следования импульсов. Для уменьшения нестабильности генератор выполняют по схеме с кварцевой стабилизацией и температурной компенсацией. Отклонение частоты измеряется в частях миллионной 10^{-6} — (part per million — ppm). Например: для номинальной частоты $F_H = 10$ МГц отклонение в 1×10^{-6} (1 ppm) составляет величину равную 10 Гц.

3.1.4 Термисторы

Существует особый класс датчиков — полупроводниковые термометры сопротивления, имеющие значительно больший, чем обычные ТС, температурный коэффициент сопротивления, равный $1...20$ $1/^\circ\text{C}$, причем знак этого коэффициента может быть как положительным (у позисторов), так и отрицательным (у термисторов). Это обеспечивает значительно более высокую чувствительность термометров на их основе. Основные преимущества: малые габариты и масса (и, следовательно, малая теплоемкость и тепловая инерционность), простота конструкции и, следовательно, хорошие надежность и механическая прочность, а также — низкая цена. Основные недостатки этих преобразователей: сравнительно узкий диапазон измеряемых температур (типично $-50...+150$ $^\circ\text{C}$), значительная нелинейность преобразования (сопротивление термисторов с ростом температуры уменьшается примерно по экспоненциальному закону); плохая повторяемость характеристики преобразования от экземпляра к экземпляру (что означает необходимость индивидуальной градуировки и затрудняет замену датчиков даже одного типа), значительная временная нестабильность характеристики, особенно при длительной работе на высоких температурах.

3.1.5 Интегральные полупроводниковые датчики.

Интегральные датчики появились сравнительно недавно благодаря успехам микроэлектроники. Эти датчики обеспечивают выходной сигнал (напряжение или ток), практически линейно зависящий от температуры в. Схемы подключения этих датчиков к собственно измерителю показаны на рис. 3.6.

На рис. 3.6, а приведена схема подключения интегрального датчика напряжения. Выходное напряжение $V = U_{(8)}$ датчика через усилитель-повторитель подается на вход цифрового вольтметра ЦВ или аналого-цифрового преобразователя АЦП, преобразующего это напряжение, пропорциональное температуре, в цифровой код. Чувствительность таких датчиков обычно 10 мВ/ $^\circ\text{C}$.

Выходной ток $I = U_{(9)}$ датчика преобразуется посредством резистора R в пропорциональное напряжение и также подается на вход ЦВ или на вход АЦП, преобразующего далее это напряжение в циф-

видно, какие типы обеспечивают наибольший диапазон измерения, максимальную чувствительность или наилучшую линейность.

В практике типовых температурных измерений чаще всего используются ТП трех типов: J, K, T. Термопары типа J имеют минимальную стоимость, высокую чувствительность, умеренную точность, но не могут (не должны) использоваться длительное время при экстремальных температурах (выше 1000 °С), так как нарушается их градуировочная характеристика. Термопары типа K характеризуются средней стоимостью, средней точностью, хорошей чувствительностью и широким диапазоном температур (до 1300 °С).

Именно этот тип ТП является наиболее распространенным.

Термопары типа T имеют среднюю стоимость, среднюю чувствительность, высокую точность. Они удобны для работы с невысокими температурами.

Для работы при высоких температурах и/или в условиях действия агрессивных сред применяются ТП типов R и S.

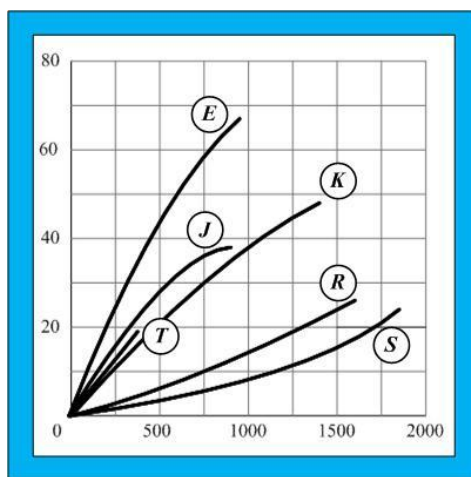


Рис. 3.5. Характеристики некоторых типов ТП: E — хромель — константан;
K — хромель — алюмель; R — платина — платинородий (13% родия);
T — медь — константан

Погрешность преобразования связана с формированием временных ворот сигналами *Старт* и *Стоп*. Формирование производится с помощью триггерных схем. Так как крутизна фронта импульса конечна, то в результате суммирования напряжения импульсов *Старт* и *Стоп* с напряжением помех, возможных при работе схемы, смещаются моменты срабатывания триггера. Следовательно, длительность сформированных триггером временных ворот t_x^* отличается от измеряемого интервала t_x — появляется погрешность, которую называют погрешностью запуска триггера: $\Delta_{zan} = t_x^* - t_x$. Поскольку эта погрешность случайная, то ее характеризуют среднеквадратическим значением. При расчетах пользуются среднеквадратическим значением относительной погрешности, обозначаемой δ_{zan} . При использовании современных быстрых цифровых устройств, реализованных на ПЛИС [7], эта погрешность минимальна и ею можно пренебречь.

Погрешность сравнения (измеряемого интервала t_x с периодом следования $T_{сч}$ счетных импульсов) определяется тем, что измеряемое значение интервала времени заменяется целым числом периодов следования счетных импульсов (выполняется процедура округления до целого числа). Такую составляющую погрешности измерений называют погрешностью дискретности. Она возникает вследствие того, что импульс временных ворот (стробирующий импульс) длительно-стью t_x и счетные импульсы генератора в общем случае не синхрон-ные сигналы.

В реальной схеме измерения непосредственно фиксируется число попавших во временные ворота счетных импульсов, а не число периодов их следования. В этом случае округление может выполняться в сторону как большего, так и меньшего значения.

Рассмотрим два случая сравнения измеряемого интервала t_x с периодом следования $T_{сч}$ счетных импульсов, которые позволят оценить максимальное значение абсолютной погрешности дискретности. На рис.1.3 изображены две ситуации, когда примерно одинаковые временные ворота «вырезают» разное число импульсов счетной серии.

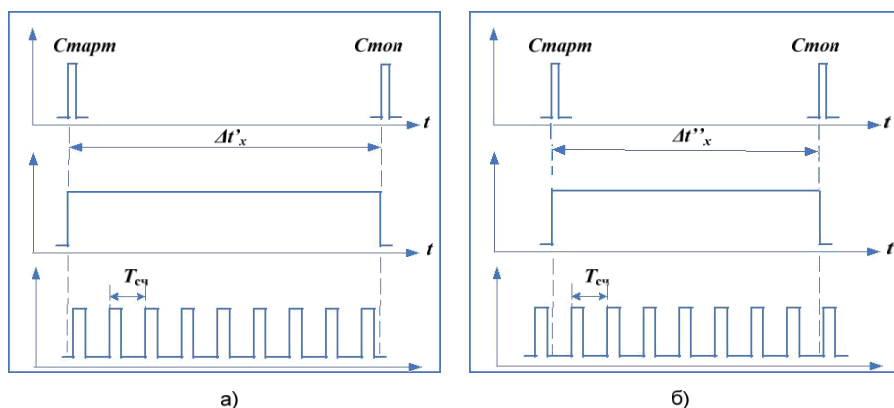


Рис.1.3. Иллюстрация погрешности дискретности измерителя временных интервалов:
а) число импульсов $m = 9$, б) число импульсов $m = 7$.

Если равенство (1.1) выполняется точно, то это означает, что измеряемый интервал t_x точно «вырезает» m периодов следования счетных импульсов (в нашем случае $m = 8$). В случае, показанном на рис.1.3,а, когда t'_x примерно равен t_x , но t'_x чуть больше t_x , то есть интервал t'_x практически равен m периодам T_{cy} , счетчик сосчитывает $m' = m + 1 = 9$ импульсов. При этом значение t'_x измеряемого интервала определится из выражения $t'_x = m'T_{cy} = (m + 1)T_{cy}$. Если принять $t_x = mT_{cy}$ за действительное значение, то абсолютная погрешность дискретности составит

$$t'_x - t_x = (m + 1)T_{cy} - mT_{cy} = +T_{cy}.$$

Другая ситуация, когда t''_x также примерно равен t_x , но t''_x чуть меньше t_x , счетчик сосчитывает $m'' = m - 1 = 7$ импульсов. Тогда получим $t''_x = m''T_{cy} = (m - 1)T_{cy}$ и абсолютная погрешность дискретности составит

$$t''_x - t_x = (m - 1)T_{cy} - mT_{cy} = -T_{cy}.$$

Таким образом, максимальное значение *абсолютной погрешности дискретности* при измерении интервалов времени

$$\Delta = \pm T_{cy} \quad (1.3)$$

Абсолютная погрешность дискретности не зависит от значения измеряемого интервала времени, а определяется единицей дискрети-

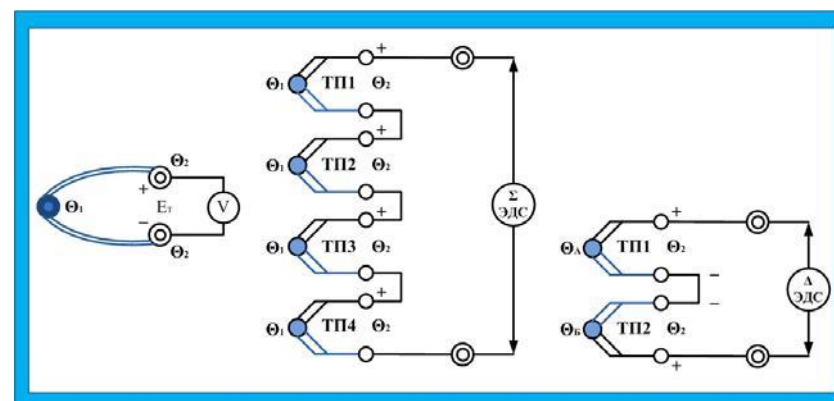


Рис.3.4. Термоэлектрические преобразователи (термопары):
а — возникновение термоЭДС; б — термобатарея; в —
дифференциальная термопара; Θ_1 — температура рабочего спая; Θ_2 —
температура свободных концов; V — измеритель ЭДС или напряжения.

Табл. 3.1 Основные характеристики некоторых типов термопар

Тип ТП	Материал ТП	Диапазон измерения (кратковременно), °C	Коэффициент преобразования, мкВ/°C при 20°C
E	Хромель — константан	-270...+1000	62
J	Железо — Константан	-210...+1000 (1200)	51
K(TXA)	Хромель — Алюминий	-200...+1000 (1372)	40
R(TПП)	Платина — платинородий (13% родия)	-50...+1500 (1700)	7
S(TПП)	Платина — платинородий (10% родия)	-50...+1600 (1768)	7
T(TМК)	Медь — Константан	-270...+400	40

Отметим, что в нашей стране приборостроительными фирмами ТП типа *E* и *J* не выпускаются. Графическая иллюстрация характеристик основных типов ТП приведена на рис. 3.5. Наглядно

чается в следующем. Если два проводника из различных металлов (сплавов) соединены в замкнутую цепь, причем температура одного соединения (спая) заметно отличается от температуры другого, то возникает термоЭДС E_m (и в замкнутой цепи будет протекать ток), значение которой зависит от разности температур спаев и характеристик материалов проводников. Если в разрыв свободных концов включен измеритель ЭДС или вольтметр V , то его показания будут определяться разницей температур ($\theta_1 - \theta_2$) (рис. 3.4). Зависимость термоЭДС от разности температур спаев нелинейна, но для небольших диапазонов температур, при невысоких точностных требованиях (или упрощая взгляд на характеристику ТП) ее можно считать приближении) следующим образом:

$$E_T = S_T (\theta_1 - \theta_2),$$

где S_T — чувствительность ТП (коэффициент преобразования); θ_1 — температура рабочего (так называемого «горячего») спаев;

θ_2 — температура свободных (так называемых «холодных») концов. Для обеспечения однозначной зависимости термоЭДС от температуры θ_1 необходимо поддерживать постоянной и известной температуру θ_2 . Обычно это 0 или +20 °С. Таким образом, зная значение S_T и измерив значение термоЭДС термопары, можно опре-

делить температуру θ_1 . Конечно, для работы в широких температурных диапазонах необходимо пользоваться более точными выражениями полиномиальными аппроксимациями нелинейных значений зависимости E_T от разности температур. В современных цифровых термометрах применяется автоматическая линеаризация характеристик преобразования ТП. В настоящее время, как правило, вместо методов и средств поддержания постоянства значения θ_2 применяются способы и устройства автоматической компенсации влияния температуры окружающей среды на свободные концы ТП.

Так же широко применяется, термопара типа L (хромель-копель), ее диапазон измерения температуры (-50...+400). В таблице 3.1 приведены характеристики термопар.

зации, то есть $T_{сч}$. Наибольшая *относительная погрешность дискретности* составляет

$$\delta_D = \pm (T_{сч} / t_x) = \pm 1/m \quad (1.4)$$

и зависит от значения t_x .

Максимальная абсолютная погрешность дискретности определяет разрешающую способность цифрового измерителя интервалов времени. Погрешность дискретности по своей природе случайна (исходя из не синхронности временных ворот и счетной серии) и она складывается из двух составляющих. Поскольку появление счетного импульса до переднего фронта (временных ворот) равновероятно, как и равновероятно появление счетного импульса перед срезом (задний фронт) ворот или после него, и эти две составляющие случайной погрешности независимы, то суммарная максимальная погрешность дискретности распределена в пределах $(-T_{сч}, +T_{сч})$ по закону Симпсона (треугольному закону). При этом математическое ожидание погрешности равно нулю, а среднеквадратическое значение — $T_{сч} / \sqrt{6}$.

Предел абсолютной допускаемой погрешности цифрового измерителя интервалов времени

$$\delta_{пред} = \pm [\delta_{кв} t_x + \delta_{зан} t_x + T_{сч}] = \pm [\delta_{кв} t_x + \delta_{зан} t_x + 1/F_{сч}], \quad (1.5)$$

где $\delta_{кв}$ — относительная нестабильность частоты напряжения кварцевого генератора; t_x — измеряемый интервал; $T_{сч}$ — период следования счетных импульсов; $\delta_{зан}$ — среднеквадратичная относительная погрешность запуска (можно пренебречь).

Предел допускаемой основной относительной погрешности, выраженный в процентах от измеряемого значения t_x :

$$\delta_{пред} = \pm 100 (\delta_{кв} + \delta_{зан} + 1/m), \quad (1.6)$$

где m — число счетных импульсов, заполняющих интервал времени t_x .

Есть несколько способов уменьшения погрешности дискретности: - Увеличение частоты следования счетных импульсов. Современное состояние интегральных схем дает ограничение по разрешающей способности при измерении ИВ этим методом. Например, для достижения разрешения $\delta t_{LSB} = 1 \text{ нс}$ необходима тактовая частота 1 ГГц. А получение величины разрешения в пикосекундном диапазоне требует построение схем на сверхпроводящей электронике.

- Измерение большого числа интервалов t_x , то есть интервала времени, равного $q t_x$. Это возможно только для периодических интервалов времени.

- Интерполяция, при которой (см. п. 1.1.4) учитываются не только целое число периодов счетных импульсов, но и дробные части.

1.2 Состав оборудования и подготовка его к работе

В лабораторной работе используются следующие устройства и измерительные приборы:

- *Персональный компьютер.*
- *Осциллограф С1-79.* Используется для контроля и измерения периодических интервалов времени.
- *Блок задания измеряемого интервала времени «CL-408».*
- *Учебный стенд «УС-ПЛИС-2-96».* Стенд позволяет измерять одиночные и периодические интервалы времени между событиями с различными диапазонами измерений.

Персональный компьютер:

- Процессор (CPU) — не хуже Celeron 700 МГц; -
- Оперативная память — не меньше 256 МБ;
- Свободное пространство на HDD — не меньше 100 МБ; -
- Операционная система — Linux.

Осциллограф С1-79:

Двухканальный универсальный осциллограф предназначен для визуального наблюдения и измерения параметров периодических и однократных электрических процессов. Основные характеристики:

- Диапазон частот: от постоянного тока до 100 МГц;
- Измерение временных интервалов: от 2×10^{-8} до 0,5 с;
- Погрешность измерения напряжения: не более 7,5 %.

Блок задания измеряемого интервала времени CL-408

Для выполнения лабораторной работы по измерению временных интервалов необходимо сформировать интервал времени. Блок CL-408 позволяет формировать импульс временных ворот длительностью t_x в трех режимах:

1. Ручном (локальном), с помощью кнопок «Старт» и «Стоп». Длительность импульса на выходе блока определяется интервалом времени между нажатием кнопок «Старт» и «Стоп». Этот режим используется, в основном, для проверки исправности установки.

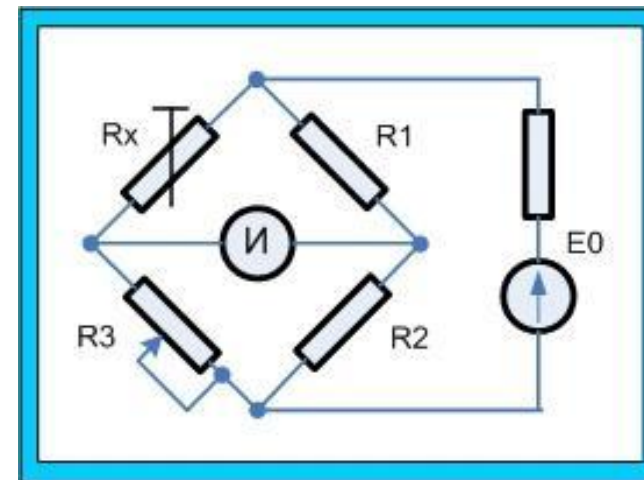


Рис. 3.3. Включение ТС в мостовую схему

3.1.3 Термопары

Приборы и преобразователи на основе термопар широко распространены. Компактные цифровые термометры на основе термопар являются в настоящее время основным и самым массовым инструментом в температурных измерениях. Выходной сигнал термопары — постоянное напряжение — довольно легко может быть преобразован в цифровой код или измерен простыми средствами (например, малогабаритным цифровым мультиметром). Термопары могут быть подключены для дальнейшего преобразования к различным вторичным измерительным преобразователям (приборам) как аналоговым, так и цифровым, для статических и динамических измерений.

Диапазон температур, измеряемых с помощью ТП, довольно широк: от - 200 до + 2000 °С. Измерители на основе ТП отличаются высокой точностью и чувствительностью, хорошей повторяемостью характеристики преобразования. Обычный диапазон выходных напряжений составляет 0...50 мВ (в зависимости от используемых в ТП материалов), типичный температурный коэффициент преобразования (чувствительность ТП) лежит в диапазоне 10...50 мкВ/°С. линейной. И тогда значение термоЭДС термопары E_T определяется (в первом В основе ТП лежит термоэлектрический эффект, суть которого заклю-

с миниатюрными объектами в динамических измерениях при быстроменяющихся температурах. α_a

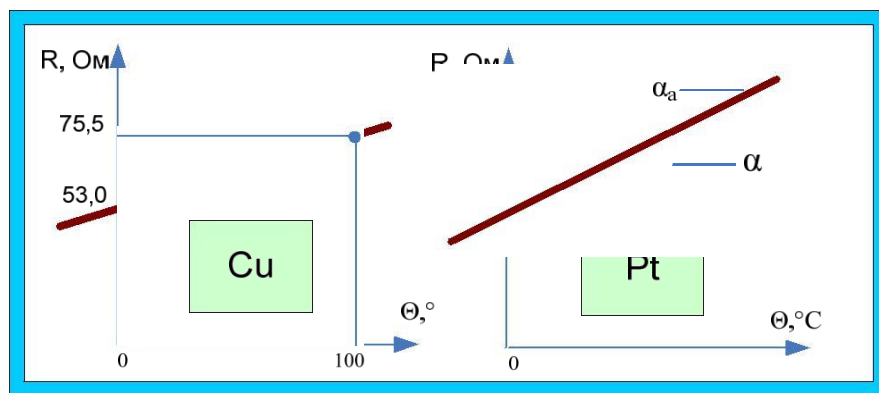


Рис. 3.2. Характеристики медных (а) и платиновых (б) ТС

Как правило, ТС включаются в мостовые схемы. Различают уравновешенные и неуравновешенные мостовые схемы. Уравновешенный мост имеет один или несколько резисторов, сопротивление которых может целенаправленно изменяться (вручную или автоматически) с тем, чтобы добиться равновесия. Равновесие моста характеризуется отсутствием разности потенциалов (и, следовательно, тока) в измерительной диагонали моста (в цепи чувствительного нулевого индикатора И), что означает равенство произведений сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_x противоположных плеч моста.

2. Автоматическом (удаленном), через интерфейс SPI, соединяющий блок *CL-408* и стенд. В этом случае длительность импульса и начало старта задается рабочей программой на ПК.

3. Комбинированном. Длительность импульса задается программно, а начало импульса — кнопкой «Старт».

Все режимы (за исключением 1) позволяют формировать импульс временных ворот разного типа: однократный и периодический. Для смены типа импульса используется тумблер «Тип импульса».

Блок позволяет задавать одиночные и периодические интервалы времени от 100 мкс до 65536 мс. При генерации периодических интервалов длительность паузы равна длительности импульса.

Учебный стенд УС-ПЛИС-2-96

Стенд УС-ПЛИС-2-96. [8] измеряет одиночные и периодические интервалы времени между событиями с различными диапазонами измерений. Основные характеристики:

- Диапазоны измерений, t_{MR} : 1 мкс, 10 мкс, 100 мкс, 1 мс;
- Нестабильность частоты генератора счетных импульсов: ± 20 ppm;
- Разрядность счетчика измерителя: 16.

Представление результатов измерений возможно на светодиодные индикаторы и/или на экран ПК. Характеристики стенда указаны в паспорте по эксплуатации [3].

На рис.1.4 представлена структура лабораторной установки.

С помощью блока *CL-408* формируется импульс временных ворот длительностью t_x , который поступает на измеритель временных интервалов, реализованный на базе учебного стенда УС-ПЛИС-2-96. Стенд содержит временной селектор и счетчик импульсов (реализованные в ПЛИС стенда). Импульс t_x открывает временной селектор, и импульсы счетной серии начинают поступать в счетчик (см. рис.1.2). После измерения интервала времени результат отображается на светодиодах стенда УС-ПЛИС-2-96 в двоичном коде или в десятичном на экране ПК через рабочую программу. При этом на экране ПК отображается число импульсов m , накопленных счетчиком. Для контроля формирования периодических импульсов и их измерения используется осциллограф *CI-79* [9]. Рабочая программа позволяет задавать длительность измеряемого интервала и отображать результаты измерения. Кроме того, программа дает возможность изменять диапазон измерения и формировать измерительный интервал.

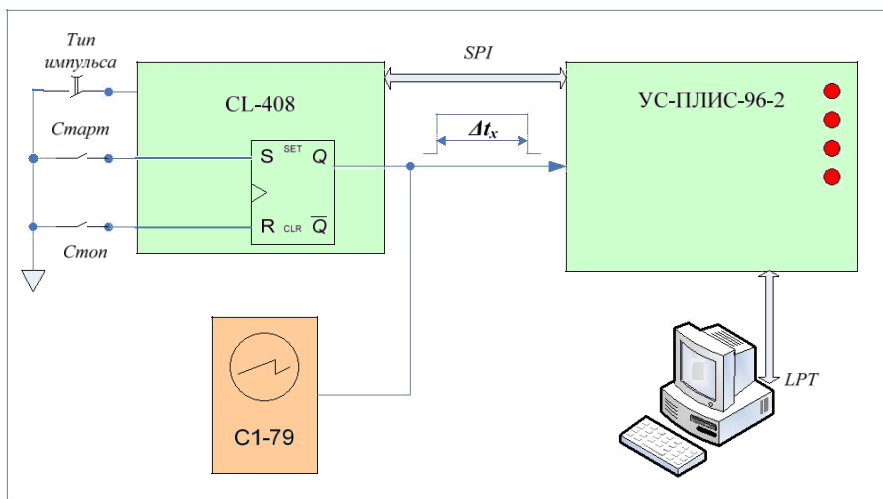


Рис.1.4. Структура лабораторной установки для формирования и измерения временных интервалов

Подготовка средств измерений к работе осуществляется в соответствии с инструкциями по эксплуатации, имеющимися на рабочем месте.

1.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить методы измерения интервалов времени, описанные в настоящем учебно-методическом пособии.
2. Собрать лабораторную установку, структура которой представлена на рис. 1.4.
3. С помощью преподавателя или лаборанта проверить правильность подключений.
4. Запустить рабочую программу на компьютере.
5. В ручном режиме (старт-стопный режим), используя блок CL-408, сформировать несколько импульсов t различной длительности. На светодиодах стенда и на экране ПК посмотреть результат измерения.

ромагнитных, например, стальных поверхностях), датчики, закрепленные на «липучей» ленте, датчики на подшипниках и др.

3.1.2 Термометры сопротивления

Приборы и преобразователи на основе металлических ТС используют зависимость электрического сопротивления металлов R_T от температуры Θ . У чистых металлов эта зависимость практически линейна и количественно выражается следующим образом:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Theta),$$

где R_0 — сопротивление при температуре 0°C ; α — температурный коэффициент сопротивления, который определяется по формуле

$$\alpha = (R/R) / \Delta\Theta$$

где R/R — относительное изменение сопротивления датчика при изменении температуры $\Delta\Theta$.

Медные ТС выпускаются с различными номинальными значениями сопротивления: 25... 1000 Ом. Например, на рис. 8.2, в показана характеристика медного (Си 53) ТС с номинальным (при 0°C) сопротивлением $E_0 = 53$ Ом.

Платиновые ТС довольно широко распространены в различных технических измерениях. Они изготавливаются из чистой платины (99,99 %). Чаще всего используются ТС с номинальным сопротивлением 100 Ом (Pt100) при 0°C , хотя существуют ТС и с другими значениями номинального сопротивления: 25, 500, 1000 Ом. Номинальные значения токов, протекающих по ТС, обычно таковы: мА (для PT 100) и 0,1 мА (для Pt 1000). Температурный коэффициент сопротивления α платиновых ($P^* 100$) ТС имеет два значения: по *европейской* версии $\alpha_e = 0,00385$ Ом/Ом/ $^\circ\text{C}$ и по *американской* версии $\alpha_a = 0,00392$ Ом/Ом/ $^\circ\text{C}$ (рис. 3.2, б). Конструктивно ТС состоят из собственно чувствительного элемента, защитного кожуха (чехла) и элементов крепления. Чувствительный элемент представляет собой катушку из тонкой изолированной проволоки (диаметром доли миллиметра) на диэлектрическом каркасе (стержне), выполненном из слюды, керамики или стекла. Существуют также ТС фольгового (тонкопленочного — Thin Film Detector — TFD) исполнения, обеспечивающего минимальную тепловую инерционность датчика. Фольговые (пленочные) ТС — имеют в 5... 10 раз меньшее значение времени реакции (отклика), чем у проволочных ТС, что чрезвычайно важно при работе

недостатки — возможное значительное влияние (на результат измерения) сопротивления проводников линии связи, необходимость дополнительного источника питания (напряжения или тока). Кроме того, возможен саморазогрев ТС от протекающего по нему тока, что может привести к дополнительным погрешностям.

Термопары не требуют дополнительного источника питания, имеют широкий диапазон измеряемых температур. Однако им присуща заметная нелинейность характеристики преобразования. Некоторые проблемы создает необходимость учета (или компенсации) влияния температуры свободных концов ТП на результат измерения. Кроме того, малое выходное напряжение (и сравнительно невысокая чувствительность) требует довольно чувствительных вторичных преобразователей (усилителей) или измерительных приборов, включенных на выходе. Термометры сопротивления и термопары отличаются достаточно высокой точностью, стабильностью и повторяемостью своих характеристик преобразования.

Термисторы (полупроводниковые сопротивления), имеют высокую чувствительность, простую двухпроводную схему включения (не требующую компенсации температуры свободных концов, как у ТП), высокое быстродействие. Но при этом у них есть серьезные недостатки: резко нелинейная характеристика преобразования и плохая повторяемость характеристики. Кроме того, они имеют узкий диапазон измеряемых температур.

Полупроводниковые интегральные датчики характеризуются высокой линейностью характеристики преобразования, однако имеют ограниченный диапазон измеряемых температур (до 150...200~С) и, кроме того, требуют наличия внешнего источника питания. У датчиков на основе кварцевых резонаторов выходной величиной является изменение резонансной частоты колебаний при изменении температуры. Такие датчики обеспечивают наиболее высокую точность, правда, в узком диапазоне температур.

Все упомянутые датчики выпускаются в различных конструктивных исполнениях, что позволяет решать самые разнообразные задачи (работать с жидкостями, газами, сыпучими средствами, с поверхностями различных профилей, в различных температурных диапазонах и др.) Есть датчики для поверхностных измерений, погружные, воздушные, магнитные датчики (которые легко крепятся на фер-

6. С помощью интерфейса рабочей программы задать длительность первого измеряемого интервала t_1 , указанного в варианте задания и первый диапазон измерения t_{MR1} .

7. Выполнить несколько запусков (не меньше 3) импульсов с помощью кнопки *Старт*. Результаты занести в таблицу.

8. Повторить пункт 7 с другими диапазонами измерений t_{MR} .

9. С помощью интерфейса рабочей программы задать длительность второго измеряемого интервала t_2 , указанного в варианте задания и первый диапазон измерения t_{MR1} .

10. Выполнить несколько запусков (не меньше 3) импульсов с помощью кнопки *Старт*. Результаты занести в таблицу.

11. Повторить пункт 10 с другими диапазонами измерений t_{MR} .

12. Перевести тумблер «*Тип импульса*» блока *CL-408* в режим запуска периодических интервалов времени. Задать длительность измеряемого интервала t_3 . С помощью кнопки *Старт* запустить генерацию периодических интервалов.

13. Наблюдать на экране осциллографа периодическую последовательность. Измерить длительность импульсов на различных диапазонах измерения осциллографа (1 мкс и 10 мкс) и измерителя.

14. Записать результаты измерения осциллографом и измерителем в таблицу.

15. Вычислить погрешности измерения, указанные в Таблице 1.

16. Сравнить результаты измерения периодических интервалов времени осциллографом и измерителем.

Табл. 1. Результаты измерения интервалов времени методом дискретного счета

Интервал	m	d	δd	$\delta_{пред}$
$t_1 =$				
$t_2 =$				
$t_3 =$				

Требования к выполнению отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в отдельной тетради и должен содержать:

1. Название лабораторной работы, ее цель, задачи.
2. Вариант задания.
3. Рисунок структуры лабораторной установки для формирования и измерения временных интервалов
4. Таблицу с результатами измерений интервалов времени вычисленными погрешностями измерения.

Вопросы для самопроверки

1. Основные методы измерения интервалов времени.
2. Численно-импульсный метод.
3. Погрешность преобразования при численно-импульсном методе.
4. Погрешность дискретности.
5. От чего зависит относительная погрешность дискретности?

Библиографический список

1. Мирский, Г. Я. Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп. / Г.Я. Мирский. — М. : Радио и связь, 1986. — 440 с.
2. Радомский, Н.В. Измеритель временных интервалов в пикосекундном диапазоне на базе преобразователя TDC-GPX // Н.В. Радомский, С.А. Шутеев, В.А. Коковин, П.У. Юсупалиев. — ПТЭ, 2008, № 1, С. 174—175.
3. Паспорт и руководство по эксплуатации учебного стенда «УС-ПЛИС-2-96».
4. Технический паспорт осциллографа С. 1—79.

просто незаменимы), позволяют получить результат быстрее, хотя, может быть и с большей погрешностью.

Многоканальные измерители (регистраторы) температуры предназначены для регистрации нескольких процессов и/или синхронных измерений температуры в нескольких точках.

3.1.1 Контактные методы и средства измерений

Если преобразовать неэлектрическую физическую величину — температуру θ — в какую-либо пропорциональную величину (ЭДС E , напряжение U , ток I , сопротивление R , частоту f и. т. п.) с помощью первичных измерительных преобразователей, то затем ее значение можно легко определить средствами электрических измерений.

При построении первичных измерительных преобразователей (датчиков) используются разнообразные физические эффекты. В основном применяются следующие разновидности термоэлектрических датчиков:

- металлические термометры сопротивления (ТС);
- термоэлектрические преобразователи (ТП) — термопары;
- полупроводниковые термометры сопротивления (термисторы);
- полупроводниковые интегральные сенсоры (датчики);
- пьезоэлектрические (кварцевые) преобразователи с частотным выходным сигналом.

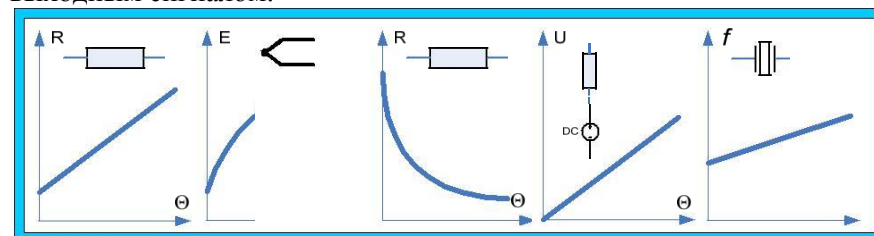


Рис.3.1. а — термометр сопротивления; б — термопара ; в — термистор; г — интегральные полупроводниковые датчики ; д — кварцевый резонатор

Можно кратко охарактеризовать основные особенности этих первичных измерительных преобразователей следующим образом.

Металлические ТС обеспечивают высокую точность, хорошие линейность, стабильность и повторяемость характеристик. Основные

Лабораторная работа № 3.

Исследование датчиков температуры

Цель работы: Рассмотрение принципа действия различных термодатчиков и исследование свойств некоторых из них.

3.1 Краткие сведения из теории

Температура — одна из важнейших физических величин, оцениваемых в задачах различных научных, технических, промышленных исследований. Температура — это своеобразная физическая величина, которая присуща всем предметам и веществам, находящимся в любом состоянии (и твердым телам, и жидкостям, и газам, и веществам в комбинированном состоянии).

Современные методы и средства измерения температуры основаны на тех или иных физических особенностях (механических, электрических, оптических свойствах) жидкостей, газов, твердых тел, проявляемых при изменении температуры.

В настоящее время используются как *электрические*, так и *неэлектрические* методы и средства измерения температуры. Неэлектрические методы представлены, например, обычными жидкостными термометрами. Электрические методы (основа современных измерений) реализованы, например, в термометрах и регистраторах на основе термоэлектрических преобразователей.

По способам преобразования информации методы и средства измерения (регистрации) делят на *аналоговые* и *цифровые*. Цифровые термометры имеют ряд известных преимуществ перед аналоговыми — более высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, быстрое действие, надежность. Кроме того, цифровая форма представления информации обеспечивает простоту дальнейшей автоматизированной обработки, хранения, передачи и представления данных.

По принципу взаимодействия прибора с объектом методы и средства измерения температуры делятся на *контактные* и *бесконтактные*. Первые проще в применении и могут обеспечивать более высокую точность. Вторые удобнее в работе (а в некоторых задачах

Лабораторная работа № 2.

Измерение давления

Цель работы: изучение методов измерения давления датчиками разного типа и оценка погрешностей измерения.

2.1 Краткие сведения из теории

Давление является одним из важнейших физических параметров, и его измерение необходимо как в расчетных целях, так и в технологических целях, например для контроля режимов напорных трубопроводов, используемых в гидро- и пневмо-приводах систем автоматизации.

Давлением P называют отношение абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела, вектора силы F к площади S этой поверхности [1]. При равномерном распределении сил давление равно частному от деления нормальной составляющей силы давления на площадь, на которую эта сила действует.

Единицы измерения давления определяются одним из двух способов:

- через высоту столба жидкости, уравновешивающего измеряемого давления в конкретном физическом процессе: в единицах водяного столба при 4°C (мм вод. ст.) или ртутного столба при 0°C (мм рт.ст.) и нормального ускорения свободного падения;

- через единицы силы и площади. В Международной системе единиц (СИ) единицей силы является Н (ньютон), а единицей площади — м^2 . Отсюда определяется единица давления паскаль $\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$.

В табл. 2.1 представлены коэффициенты перевода из одних системных или внесистемных единиц давления в другие.

2.1.1 Виды измеряемых давлений

На практике давления газообразных и жидких сред могут измеряться относительно двух различных уровней:

- уровня абсолютного вакуума;
- уровня атмосферного, или барометрического давления (ГОСТ 8.271-77).

Табл. 2.1 Коэффициенты перевода единиц давления

Системы единиц	Единицы давления	Па	кгс/см ² (ат)	бар	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.	пси (psi)
СИ	1 Па = 1 н/м ²	1	1,01972·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	0,98692·10 ⁻⁵	750,06·10 ⁻⁵	0,101972	1,45·10 ⁻⁴
МКГСС*	1 ат = 1 кгс/см ² (техническая атмосфера)	0,980665·10 ⁵	1	0,980665	0,96784	735,563	10 ⁴	14,223
Внесистемные	1 бар = 10 ⁶ дин/см ²	10 ⁵	1,01972	1	0,98692	750,06	1,01972·10 ⁴	14,5
	1 атм = 760 мм рт. ст. (физическая атмосфера)	1,01325·10 ⁵	1,0332	1,01325	1	760	1,0332·10 ⁴	14,696
	1 мм рт. ст.	133,322	1,35951·10 ⁻³	1,33322·10 ⁻³	1,31579·10 ⁻³	1	13,5951	0,019337
	1 мм вод. ст. = 1 кгс/м ²	9,80665	10 ⁻⁴	9,80665·10 ⁻⁵	9,67841·10 ⁻⁵	7,3556·10 ⁻²	1	1,422·10 ⁻³
	1 psi = 1 лб/ин ²	6,894·10 ³	≈0,07	6,894·10 ⁻²	0,068	51,715	703,08	1

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют давлением абсолютным (ДА). Барометрическое давление (ДБ) — это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря. При измерении разности давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, причем таких, что ни одно из давлений не является атмосферным, такую разность называют дифференциальным давлением (ДД). Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно избыточным (ДИ) или давлением разрежения, вакуумметрическим (ДВ).

2.1.2 Классификация приборов для измерения давления

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются *манометры* (ГОСТ 8.271-77). Если отображение на первичном измерительном приборе не производится, то должна быть возможность передавать сигнал, соответствующий измеряемому параметру дистанционно и такой прибор называют *измерительным преобразователем давления* или *датчиком давления*.

Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению и по типу отображения данных.

Кратко охарактеризуем основные типы манометров:

4. Принцип измерения давления с помощью деформационных датчиков давления.

5. Классификация измерительных преобразователей давления по принципу действия.

Библиографический список

1. Мирский, Г. Я. Электронные измерения: 4-е изд., перераб. и доп. / Г.Я. Мирский. — М. : Радио и связь, 1986. — 440 с.
2. Паспорт и руководство по эксплуатации учебного стенда CLA-117.
3. www.metrans.ru

6. Повторить действия пунктов 4 и 5 заданное число раз, при этом давление сжатого воздуха на выходе БПВ изменять через 0,05 МПа.

7. Рассчитать погрешность измерения по каждому измерительному прибору *Д1 Д2 Д3* и занести в таблицу

Табл. 2.3. Результаты измерения давления и усилия с помощью датчиков Д1, Д2 и Д3.

Параметр	<i>Д1, МПа</i>	<i>Д2, МПа</i>	<i>Д3, мV</i>	<i>д1</i>	<i>д2</i>	<i>д3</i>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

Требования к выполнению отчета

Отчет по лабораторной работе выполняется в отдельной тетради и должен содержать:

1. Название лабораторной работы, ее цель, задачи.
2. Вариант задания.
3. Рисунок структуры лабораторной установки для измерения давления и усилия.
4. Таблицу с результатами измерений давления, вычисленными погрешностями измерения.

Вопросы для самопроверки

1. Виды измеряемых давлений.
2. Классификация приборов для измерения давления.
3. Принцип измерения давления с помощью электрических датчиков.

1. По принципу действия:

- жидкостные (измеряемое давление уравнивается гидростатически столбом жидкости (воды, ртути) соответствующей высоты);
- деформационные (давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ) — мембраны, трубчатой пружины, сильфона);
- электрические (давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты — чувствительного элемента (ЧЭ) — мембраны, трубчатой пружины, сильфона)

2. По виду измеряемого давления:

- собственно манометры (приборы для измерения избыточного и абсолютного давления);
- вакуумметры (приборы для измерения разрежения);
- барометры (приборы для измерения атмосферного давления);
- дифференциальные манометры (приборы для измерения разностного давления).

Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и др.).

3. По области применения:

- общепромышленные или технические (работающие в промышленных условиях);
- лабораторные (приборы повышенной точности для использования в лабораторных условиях);
- образцовые (для поверки рабочих манометров);
- специальные (применяются в экстремальных условиях: на железнодорожном транспорте, судах, котельных установках и в агрессивных средах).

4. По типу отображения данных:

- прямопоказывающие (с визуальным считыванием данных непосредственно по шкале (стрелочной или цифровой) прибора);
- сигнализирующие (электроконтактные) (с формированием управляющего сигнала при достижении заданного давления);
- регистрирующие (с записью в память значений давления как функции времени).

Измерительные преобразователи давления (ИПД) классифицируют по принципу действия, виду измеряемого давления и типу выходного сигнала.

По принципу действия или способу преобразования измеряемого давления в выходной сигнал ИПД подразделяются на:

- деформационные (деформационные перемещения чувствительного элемента преобразуются в электрический или электромагнитный сигнал);
- электрические (измеряемое давление воздействуя на чувствительный элемент изменяет его электрические параметры (сопротивление, емкость и т.д.).

Современные ИПД могут создаваться на других принципах — волоконно-оптических, гальваномагнитных, акустических и т. д.

1. По виду измеряемого давления ИПД подразделяются на:

- преобразователи абсолютного давления (ДА);
- преобразователи избыточного давления (ДИ);
- преобразователи вакуумметрического давления (ДВ);
- преобразователи дифференциального давления (ДД);
- преобразователи гидростатического давления (ДА);

2. По выходному сигналу:

- аналоговые (измеряемое давление преобразуется в аналого-вый сигнал);
- цифровые.

В настоящее время наметился переход от ИПД с аналоговым унифицированным токовым сигналом 0..5, 0..20 или 4..20 мА к ИПД с цифровым выходом. Широкое распространение получил цифровой протокол HART. Этот открытый стандартный гибридный протокол двусторонней связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала 4..20 мА. Кроме того, в последнее время получили распространение ИПД с интеграцией контроллеров, поддерживающих промышленные сети (Fielbus, Mod-Bus, Profibus и др.). При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях, который существенно облегчает взаимозаменяемость первичных датчиков различных производителей и их подключение.

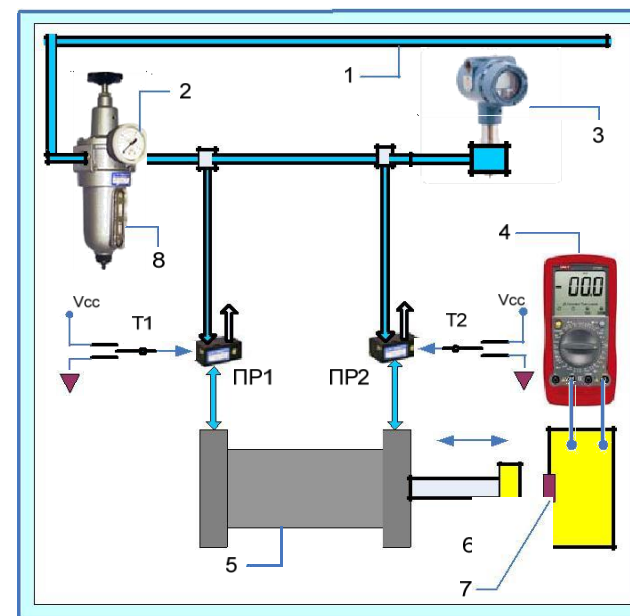


Рис.2.6. Структура лабораторной установки для измерения давления:
1 — внешняя магистраль сжатого воздуха; 2 — датчик давления Д1; 3 — датчик давления Д2 (типа Метран[2]); 4 — мультиметр; 5 — пневмоцилиндр; 6 — платформа на штоке пневмоцилиндра; 7 — датчик усилия ДЗ.

2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить типы манометров и датчиков давления, описанные в настоящем учебно-методическом пособии и в техническом описании стенда..
2. Собрать лабораторную установку, структура которой представлена на рис.2.6.
3. С помощью преподавателя или лаборанта проверить правильность подключений.
4. С помощью вентиля БПВ выставить на датчике Д1 (поз.2) первое значение давления сжатого воздуха, указанного в варианте задания.
5. Записать в таблицу показания датчика Д2 и ДЗ.

заданном уровне в пневматических приводах и имеющий характеристики:

- расход воздуха при давлении на выходе 0,4 МПа, м³/мин, номинальный, не менее — 0,63;
- диапазон настройки давления, МПа — 0,05...0,90;
- минимальное давление (на входе), МПа — 0,10.;
- превышение давления на выходе над давлением настройки, при котором открывается клапан сброса воздуха в атмосферу, МПа — 0,06;
- встроенный датчик деформационного типа (манометр) Д1 с пределом измерения, МПа — 1,0.

Электрический датчик давления 3 (Д2) со схемой измерения, выполненный на базе тензорезистора 24РСАFA6G.

Пневмоцилиндр двухстороннего действия с двумя пневмораспределителями ПР1 и ПР2:

- диаметр цилиндра — 32 мм;
- длина хода — 200 мм;
- напряжение Vcc для управления пневмораспределителями — 24 В;

Электрический датчик усилия 7 (Д3) FSG15N1A с измерительной схемой :

- диапазон измерения силы — 0,00...1500 г.

Сжатый воздух через внешнюю магистраль 1 поступает на блок подготовки воздуха (БПВ) — 8.

С помощью редукционного клапана БПВ, управляемого вентилем, сжатый воздух подается на пневмосистемы стенда. Датчики Д1 (поз.2) и Д2 (поз.3) отображают давление сжатого воздуха на внутренней магистрали. Шток пневмоцилиндра 5, перемещая платформу 6 в крайнее правое положение, создает усилие на датчик Д3 (поз.7). Для перемещения штока пневмоцилиндра необходимо управлять тумблерами Т1 и Т2, которые подают напряжение на пневмораспределители ПР1 и ПР2, тем самым управляя потоком сжатого воздуха в полости пневмоцилиндра.

2.1.3 Деформационные датчики давления

В промышленной практике измерения давления и разности давлений широкое применение получили деформационные (с упругим чувствительным элементом) приборы. В этих приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе, которые преобразуются передаточными механизмами в угловое или линейное перемещение указателя по шкале прибора.

По виду упругого чувствительного элемента пружинные приборы делятся на следующие группы: приборы с трубчатой пружиной; мембранные приборы; сильфонные приборы.

Манометры с трубчатой пружиной — один из наиболее распространенных видов деформационных приборов. Чувствительным элементом таких приборов является согнутая по дуге окружности и запаянная с одного конца трубка 1 (трубка Бурдона) эллиптического, плоскоовального или круглого сечения (рис 2.1). Одним концом трубка заделана в держатель 2, оканчивающийся ниппелем с резьбой для присоединения к полости, в которой измеряется давление. Внутри держателя есть канал, соединяющийся с внутренней полостью трубки. Если в трубку подать жидкость, газ или пар под избыточным давлением, то кривизна трубки уменьшается, и она распрямляется; при создании разрежения внутри трубки кривизна ее возрастает, и трубка скручивается. Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменения давления обусловлено изменением формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или овальное сечение, деформируясь, приближается к круглому, что приводит к раскручиванию трубки, то есть угловому перемещению ее свободного конца на небольшую величину .

В трубках круглого сечения, благодаря эксцентрическому каналу, избыточное давление, действуя на заглушку свободного конца трубки, создает момент, вызывающий уменьшение ее кривизны. Это перемещение в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению и равно $=kP$.

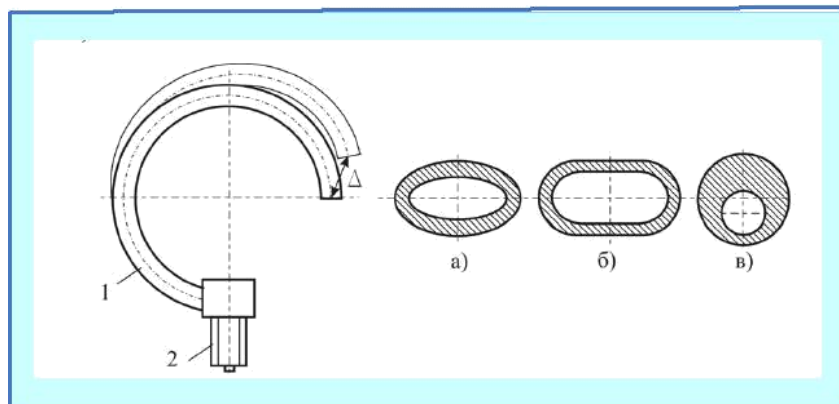


Рис. 2.1. Чувствительный элемент манометра — трубка Бурдона: ,
а — эллиптического сечения; б — плоскоовального сечения;
в — круглого сечения
1 — трубка; 2 — держатель

Мембранные приборы. Приборы с чувствительным элементом в виде плоских и гофрированных мембран, мембранных коробок и мембранных блоков применяют для измерения небольших избыточных давлений и разрежений, а также перепадов давления.

Мембрана представляет собой тонкий лист определенного диаметра, выполненный из металла или специального упругого материала, который жестко закрепляется по периметру в измерительном блоке (рис. 2.2). Под воздействием измеряемого давления P_1 , (при условии $P_1 > P_2$, где P_2 — внешнее давление) происходит прогиб мембраны на величину h , что в дальнейшем приводит к преобразованию этого перемещения во вращательное движение стрелки прибора. Мембраны делят на упругие и «вялые».

Упругие мембраны выполняют из тонких металлических пластин (сталь, бронза, латунь). «Вялые» мембраны выполняют из прорезиненной тонкой ткани (капрон, шелк, полотно). К ним предъявляют два требования — отсутствие собственной жесткости и большая прочность. Эти требования вытекают из основного назначения «вялых» мембран — преобразовывать большие перепады давления в силу при крайне малых перемещениях (порядка сотых долей мм). «Вялые» мембраны обычно снабжены металлическим жестким центром.

формируемой детали (чувствительному элементу датчика). В результате можно увеличить значение номинального тока до 0,2 А. Сопротивление фольговых тензопреобразователей равно 30...250 Ом.

Основными достоинствами проволочных и фольговых тензопреобразователей являются: практически полное отсутствие их влияния на деформацию детали; линейность характеристики; низкая стоимость.

Основным недостатком является относительно низкий температурный диапазон работоспособности: от -40 до +70°C.

Проволочные тензопреобразователи отличаются от проволочных и фольговых большим (до 50%) изменением сопротивления при деформации и более высоким пределом чувствительности к температуре (в 10...20 раз).

Их преимущества заключаются в более высоком (в 60 раз) коэффициенте тензочувствительности, малых размерах (длина базы $A=3...10$ мм), больших значениях выходного сигнала. Наиболее сильно тензоэффект выражен в таких полупроводниковых материалах, как германий, кремний, арсенид галлия и др. Для тензопреобразователей чаще применяют германий и кремний в виде пластин толщиной 0,03...0,2 мм, шириной 0,5...1 мм и длиной (базой) 3...15 мм.

Основными недостатками полупроводниковых тензопреобразователей являются: малая гибкость, небольшая механическая прочность, нелинейность характеристики, большой разброс характеристик однотипных преобразователей. Несмотря на данные недостатки, основная масса датчиков давления выпускаются на основе тензорезисторных чувствительных элементов.

2.2 Состав оборудования и подготовка его к работе

Лабораторная работа по измерению давления проводится на базе учебного стенда CLA-117 [2], предназначенного для изучения работы пневмопривода. Сжатый воздух на вход стенда подается через внешнюю магистраль 1 от компрессора К-12. В состав стенда входят следующие компоненты (рис. 2.6):

Блок подготовки воздуха ПФР-К 2 содержит редукционный клапан и рассчитан для работы на сжатом воздухе давлением от 0.1 МПа до 1.0 МПа со встроенным датчиком деформационного типа Д1 (манометр), предназначенный для поддержания величины давления на

формации. По конструктивному исполнению тензопреобразователи делятся на проволочные, фольговые и полупроводниковые.

Проволочные тензопреобразователи (рис. 2.5) конструктивно представляют отрезок тонкой проволоки 1 (диаметром 0,02...0,05 мм), которая зигзагообразно наклеена на тонкую основу (подложку) 2. Сверху проволока закрыта лаковой пленкой 3. Для включения в измерительную схему к концам проволоки припаиваются медные выводы 4. Измерительной базой преобразователя является длина петель решетки A , величина которой лежит в пределах 1,5...100 мм. Ширина решетки B равна 5...10 мм. Номинальное сопротивление 10...1000 Ом, номинальный ток — 30 мА.

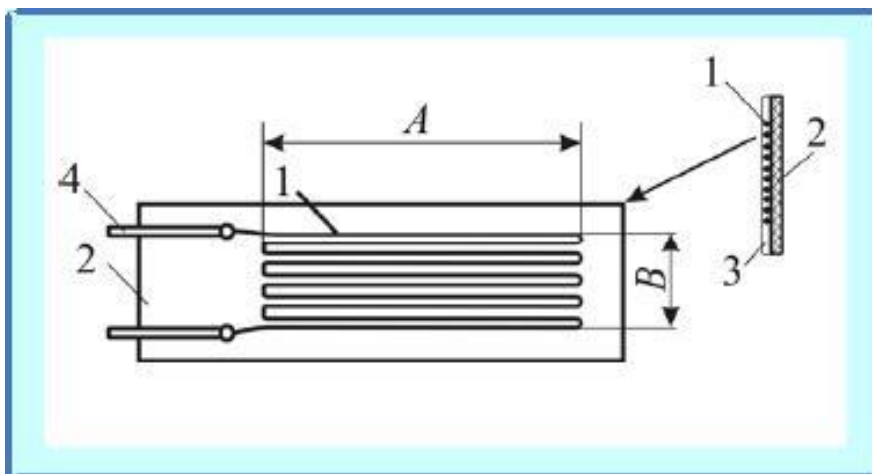


Рис. 2.5. Проволочный тензопреобразователь:
1 — проволока; 2 — подложка;
3 — защитная пленка; 4 — медные выводы.

Фольговые тензопреобразователи представляют собой дальнейшее развитие проволочных. В них вместо решеток из проволоки применяют решетку из фольги толщиной 0,004...0,012 мм. Фольговые тензопреобразователи могут пропускать больший ток, чем проволочные, благодаря большей площади поперечного сечения проводника при тех же размерах решетки и большей теплоотдаче, улучшающей теплообмен, вследствие большей площади прилегания к де-

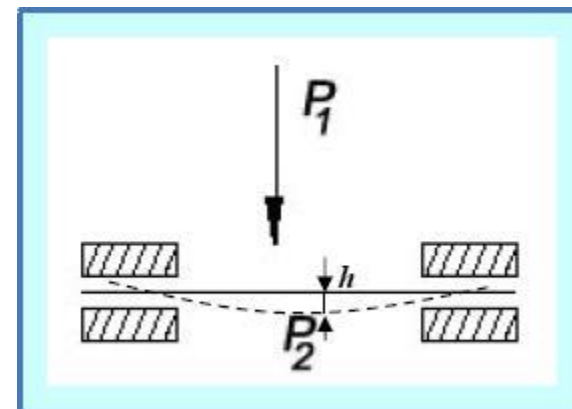


Рис. 2.2. Мембрана и ее прогиб

2.1.4 Электрические датчики давления

В данных приборах измеряемое давление, оказывая воздействия на чувствительный элемент, изменяет его собственные электрические параметры: сопротивление, емкость или заряд, которые становятся мерой этого давления. Подавляющее большинство современных общепромышленных ИПД реализовано на основе трех основных принципов:

- *емкостные* — используют упругий чувствительный элемент в виде конденсатора с переменным зазором: смещение или прогиб под действием прилагаемого давления подвижного электрода — мембраны относительно неподвижного изменяет его емкость;
- *пьезоэлектрические* — основаны на зависимости поляризованного заряда или резонансной частоты пьезокристаллов: кварца, турмалина и других от прилагаемого к ним давления;
- *тензорезисторные* — используют зависимость активного сопротивления проводника или полупроводника от степени его деформации.

Емкостные преобразователи давления. Принцип действия емкостных преобразователей основан на изменении емкости переменного конденсатора C под воздействием преобразуемой неэлектрической величины (в нашем случае — давления). Емкость конденсатора зависит от расстояния между пластинами (обкладками) δ , площади пластин S , диэлектрической постоянной между пластинами E .

На рис. 2.3 схематически изображено устройство плоскопараллельных емкостных преобразователей, основанных на трех принципах: изменении величины зазора δ между обкладками конденсатора (рис.2.3, а); изменении площади S перекрытия пластин в результате их относительного смещения (рис.2.3, б); изменении диэлектрической проницаемости E (рис.2.3, в). В случае (рис.2.3, а) одна из пластин конденсатора может быть поверхностью объекта (детали).

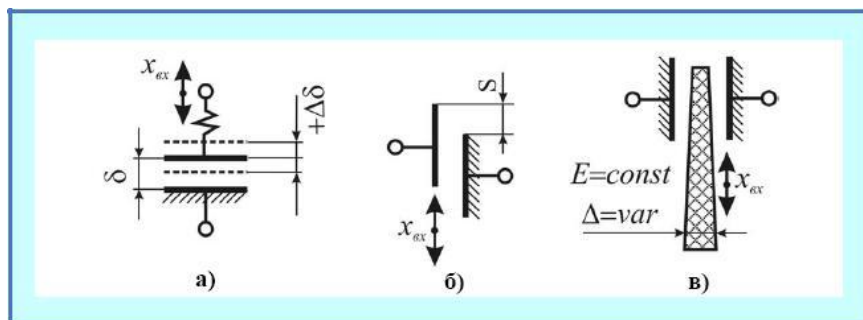


Рис. 2.3. Емкостные преобразователи:

а — с изменяющейся величиной зазора; б — с изменяющейся площадью; в — с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

Характеристика управления емкостного плоскопараллельного преобразователя с изменяющимся воздушным зазором определяется выражением:

$$C = ES/\delta,$$

где C — емкость конденсатора, Ф; δ — расстояние между обкладками, м; E — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками, Ф/м; S — площадь обкладок, м². В случае (рис.2.3, а) емкость изменяется по гиперболическому закону, в остальных — линейно.

Пьезоэлектрические преобразователи давления. В основе действия пьезоэлектрических преобразователей лежит свойство некоторых кристаллических веществ создавать электрические заряды под действием электрической силы, которое называется пьезоэффектом. Пьезоэффектом обладают кристаллы кварца, турмалина, сегнетовой соли и некоторых других веществ. Заряды возникают мгновенно в момент

приложения силы, что широко используется в исследовании быстропротекающих процессов.

Элементарной структурной ячейкой кварца является шестигранная призма, изображенная на рис. 2.4. В кристаллах кварца различают продольную ось ZZ , называемую оптической осью, ось XX , проходящую через ребра призмы (электрическую ось), и ось YY , проходящую через середины противоположных граней (механическая или нейтральная ось).

Силы, приложенные к параллелепипеду в направлении оси ZZ , не вызывают электризации, а растягивающая или сжимающая силы F_x , приложенные в направлении электрической оси, вызывают появление разноименных зарядов на гранях, перпендикулярных к этой оси. Заряд, возникающий на гранях, равен:

$$q_x = kF_x = kP_xS_x,$$

где P_x и F_x — давление и сила, действующие на грань; S_x — площадь грани; k — постоянная пьезоэлектрическая величина.

Пьезоэлектрическая постоянная кварца практически не зависит от температуры до 500°C. При температуре выше 500°C она быстро уменьшается и при температуре 570°C становится равной нулю.

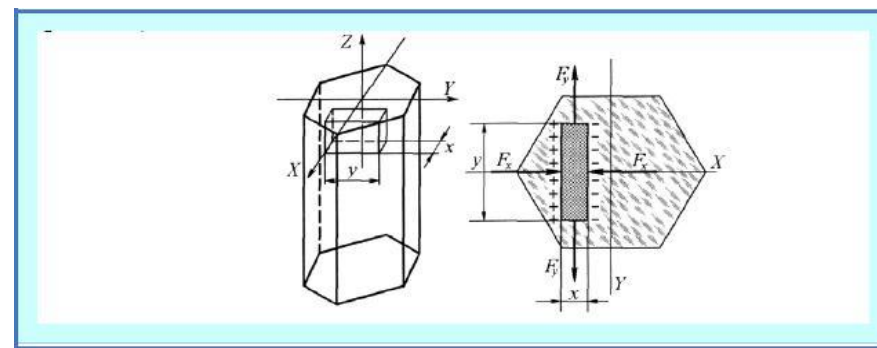


Рис. 2.4. Схема кристалла кварца

Тензорезисторные преобразователи давления. В основе работы тензопреобразователей (тензорезисторов) лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической де-

