

Сибирский государственный университет путей сообщения

Физические основы измерений.

Практикум для лабораторных работ по
дисциплине «Физические основы измерений»

Новосибирск 2012

Физические основы измерений. Практикум для лабораторных работ по дисциплине «Физические основы измерений» / Сост. С.А. Бехер, Е.С. Тенитилов. - Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2012. – ___ с.

Рассмотрены основные сведения о физических эффектах, используемых для измерения физических величин, практические задания и рекомендации по их выполнению для аудиторных занятий при выполнении лабораторных работ, направленных на изучение первичных преобразователей температуры, световых и магнитных величин, деформаций, акустических колебаний и волн, вискозиметров, контрольные вопросы для самостоятельного изучения и защиты лабораторных работ.

Предназначен для студентов специальностей 200503 «Стандартизация и сертификация», 221700 «Стандартизация и метрология» при изучении дисциплин «Физические основы измерений», Физические основы измерений и эталоны и студентов других специальностей изучающих дисциплину «Метрология, стандартизация и сертификация».

Рассмотрен и рекомендован к печати на заседании кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация».

Ответственный редактор
проф., д-р техн. наук Степанова Л.Н.

Рецензент
доцент кафедры «Физика» СГУПСа, к.т.н. Стариков Е.И.

© Бехер С.А., Тенитилов Е.С., сост., 2012

© Сибирский государственный университет путей сообщения

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Лабораторная работа №1 – Измерительные преобразователи температуры	5
Теоретическая часть	5
Практическая часть	14
Контрольные вопросы	16
Лабораторная работа №2 – Измерение световых величин	16
Теоретическая часть	16
Практическая часть	28
Аналитическая часть	31
Контрольные вопросы	32
Лабораторная работа №3 – Измерение вязкости	34
Теоретическая часть	34
Практическая часть	43
Контрольные вопросы	44
Лабораторная работа №4 – Преобразователи магнитных величин	46
Теоретическая часть	46
Практическая часть	51
Контрольные вопросы	53
Лабораторная работа №5 – Преобразователи акустических величин	55
Теоретическая часть	55
Практическая часть	65
Контрольные вопросы	66
Лабораторная работа №6 – Тензорезисторные датчики деформаций	67
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	73

ВВЕДЕНИЕ

Практикум является учебным неперiodическим изданием и предназначен для самостоятельной подготовки и выполнения лабораторных работ на практических занятиях по дисциплинам:

- «Физические основы измерений» студентов специальности 200503 «Стандартизация и сертификация»;

- «Физические основы измерений и эталоны» студентов специальности 221700 «Стандартизация и метрология»;

- «Метрология, стандартизация и сертификация» со студентами других специальностей.

Практикум необходимо использовать вместе с лекциями, учебниками для вузов, список рекомендуемой литературы приведен в конце издания.

Практикум содержит теоретические сведения и практические задания, необходимые для выполнения лабораторных работ по теме: исследование первичных преобразователей температуры, световых величин, магнитных величин, вязкости, деформаций. Практические задания включают три составляющие:

- проведение измерений характеристик первичных преобразователей;
- обработка результатов измерений;
- подготовка к защите лабораторной работы по контрольным вопросам.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: Исследовать характеристики первичных преобразователей температуры

Решаемые задачи:

- 1) Определить функцию преобразования термопары и термистора.
- 2) Экспериментально оценить характерное время переходного процесса при измерении температуры разными устройствами в жидкости и газе.

Приборы, материалы и вспомогательные средства: термопары, термистор, вольтметр, омметр нагревательный элемент, воздушный нагревательный элемент, переменное сопротивление от 10 до 8000 Ом.

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для описания макроскопического состояния тел используются физические величины, называемые *термодинамическими*. Некоторые из этих величин имеют, кроме того, механический смысл: энергия, объем, импульс и могут быть вычислены простым суммированием по всем микроскопическим составляющим системы. Величины другого рода описывают только свойства статистических систем и не имеют физического смысла в применении к немакроскопическому телу. Абсолютная температура тела или просто температура относится к этой категории физических величин.

Относительно термодинамической температуры справедливы два утверждения:

- температуры любых частей системы, находящихся в статистическом равновесии друг с другом, равны;

- при взаимодействии двух систем, энергия переходит из системы с большей температурой в систему с меньшей температурой.

Температура статистической системы имеет размерность энергии и может быть измерена в энергетических единицах – Джоуль (Дж), однако в практической деятельности человека такие единицы неудобны ($20,0^{\circ}\text{C}$ соответствует $4,04 \cdot 10^{-21}$ Дж). Поэтому в международной системе единиц СИ введена собствен-

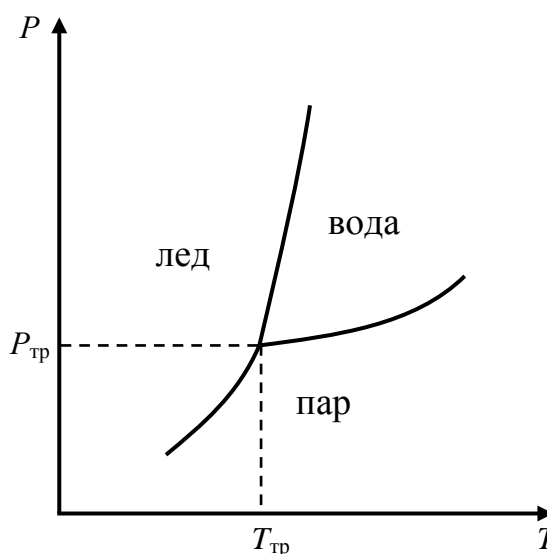


Рисунок 1.1 – Диаграмма фазовых состояний воды; температура тройной точки – $T_{тр}$, давление тройной точки – $P_{тр}$.

ная единица измерения – Кельвин, определяемая по тройной точке воды (при данной температуре вода может находиться в равновесии одновременно в твердом, жидком и газообразном состояниях). Температура тройной точки принята равной 273,16 °К точно.

Альтернативной к шкале температур Кельвина, является шкала Цельсия, в которой 0 °С соответствует температуре таяния льда, 100 °С – температуре кипения воды при нормальном давлении (101325 Па). Единицы измерения этих двух шкал совпадают (1 °С = 1 °К см. рисунок 2). Однако система Цельсия более удобна для использования в быту, так как ее начало отсчета сдвинуто область температур чаще всего реализующихся на поверхности Земли.

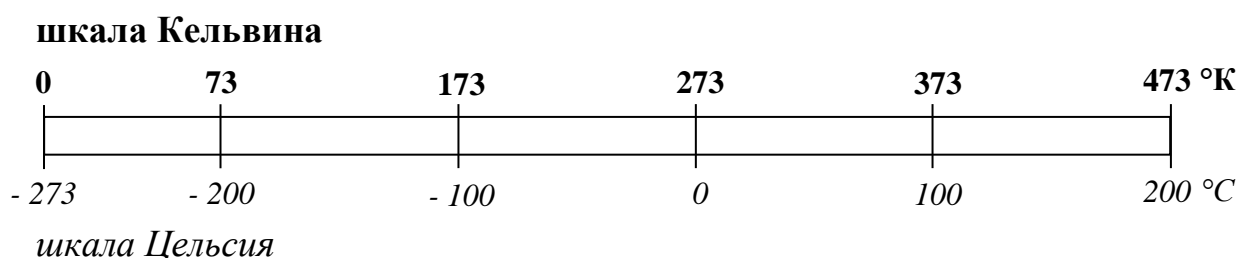


Рисунок 1.2 – Абсолютная и международная температурные шкалы

Температура (T) является одной из основных физических величин используемых для описания тепловых процессов. Как отмечалось выше температура, может быть измерена в единицах энергии, коэффициент перевода из джоулей в градусы Кельвина называется постоянной Больцмана – $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Для идеальных газов установлена пропорциональность средней кинетической энергии W поступательного движения одной молекулы и температуры:

$$W = \frac{3}{2} \cdot k_A \cdot T, \quad (1.1)$$

Уравнение Клайперона-Менделеева связывает температуру с термодинамическими величинами, имеющими механические единицы измерения:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T, \quad (1.2)$$

где p – давление газа, Па;

V – объем, м³;

m – масса, кг;

M – молярная масса, кг/моль;

R – универсальная газовая постоянная, 8,31 Дж/(моль·К).

Закон Стефана-Больцмана описывает объемную плотность W_R электромагнитного излучения нагретого абсолютно черного тела:

$$W_R = \sigma \cdot T^4, \quad (1.3)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, $5,637 \cdot 10^{-16}$ Дж/(с·м²·К⁴).

При повышении температуры тела, кроме увеличения интенсивности излучения пропорционально температуре в четвертой степени (формула 3), наблюдается изменение спектрального состава излучения. Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения смещается в коротковолновую часть спектра по закону Вина:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (1.4)$$

где λ_m – длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения, м;

b – постоянная Вина, $2,8972 \cdot 10^{-3}$ м·К;

Термометры – общее название приборов и устройств, предназначенных для измерения температуры в самых различных областях сферы деятельности человека:

- на производстве измерение температуры позволяет осуществлять контроль и регулирование технологических процессов нагрева и охлаждения (температурная обработка материалов, прессовое изготовление деталей);
- в эксплуатации проводится мониторинг состояния и управление режимами работы устройств и деталей (в автомобиле в зависимости от температуры охлаждающей жидкости изменяется число оборотов холостого хода; а на железной дороге при значительном изменении температуры окружающей среды устанавливают или убирают вставки в бесстыковом пути).

Наибольшее распространение получили методы измерения температуры, основанные на следующих физических явлениях:

- изменение объема жидких, газообразных и твердых тел при повышении температуры (для большинства материалов расширение);
- изменение электрического сопротивления материала при изменении температуры;
- увеличение электрического напряжения в месте контакта двух разнородных материалов при повышении температуры (термоэлектричество);
- изменение спектральной плотности и интенсивности электромагнитного излучения тел при нагревании (бесконтактный способ).

Термометры расширения

Газы, жидкости и твердые тела имеют атомно-молекулярное строение. Атомы и молекулы при любой температуре находятся в хаотическом тепловом движении, чем выше температура вещества, тем более высокой энергией обладают атомы и молекулы. С ростом тем-

пературы увеличивается среднее расстояние между атомами и молекулами, в результате чего газы, жидкости и твердые тела расширяются:

- коэффициенты расширения различных газов близки между собой ($0,0037 \text{ 1/}^\circ\text{C}$);
- для жидкостей коэффициенты могут различаться на порядок (ртуть - $0,00018 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, глицерин - $0,0005 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, ацетон - $0,0014 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, эфир - $0,007 \text{ 1/}^\circ\text{C}$);
- величина теплового расширения твердых тел определяется их строением: структуры с плотной упаковкой (алмаз, платина, отдельные металлические сплавы) мало чувствительны к температуре, рыхлая, неплотная упаковка вещества способствует сильному расширению твердых тел (алюминий, полиэтилен).

Типичным термометром, основанным на тепловом расширении, является жидкостный термометр представленный на рисунке 3. Данное устройство состоит из стеклянного баллона 1, капиллярной трубки 3, и резервуара 2. Термометрическая жидкость (ртуть, спирт, керосин, толуол) заполняет резервуар и часть капиллярной трубки. При увеличении температуры рабочая жидкость расширяется, заполняя капилляр. Таким образом, жидкостный термометр преобразует температуру в аддитивную физическую величину – длину заполненного капилляра.

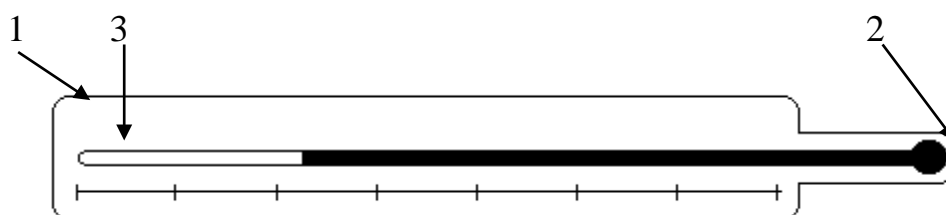


Рисунок 1.3 – Термометр расширения

Объем жидких и твердых тел в некотором температурном интервале с достаточной точностью можно считать прямо пропорциональным температуре:

$$V=V_0 (1+\gamma \cdot (T-T_0)), \quad (1.5)$$

где γ – коэффициент объемного расширения рабочей среды, $1/^\circ\text{C}$;

T_0, T – начальная и конечная температуры тела, $^\circ\text{C}$;

V_0, V – начальный и конечный объемы рабочей жидкости, м^3 .

При значительном изменении температуры наблюдается отклонение от линейной зависимости, это означает, что коэффициент γ в формуле (5) непостоянная величина, зависящая от температуры (рисунок 4). Практическое использование эффекта теплового расширения для измерений возможно в небольшом температурном диапазоне, в котором коэффици-

ент объемного расширения среды постоянен с необходимой для применяемой модели точностью.

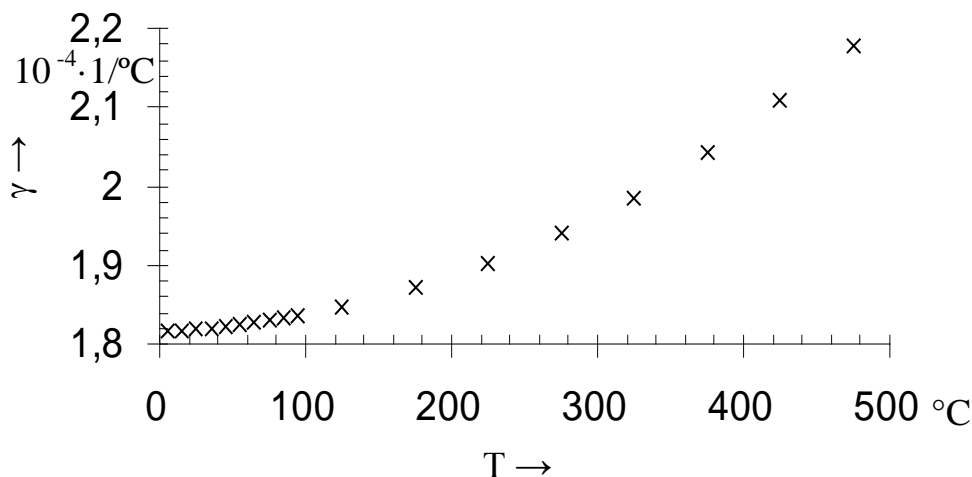


Рисунок 1.4 – Зависимость коэффициента объемного расширения γ ртути от температуры

Определим зависимость температуры от высоты столбика рабочей жидкости, для этого преобразуем формулу (5) к виду:

$$T = T_0 + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{V - V_0}{V_0}, \quad (1.6)$$

Считая, что жидкость находится в капилляре с площадью поперечного сечения S и в запасном резервуаре объемом V_p , перепишем формулу (6) через длину столбика рабочей жидкости l :

$$T = T_0 + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{S \cdot l + V_p - V_0}{V_0}, \quad (1.7)$$

Геометрические размеры капилляра с небольшой погрешностью можно считать постоянными величинами. Материал капилляра и запасного резервуара обладает коэффициентом объемного теплового расширения менее 1% от коэффициента рабочей жидкости, (стекло «пирекс» значение коэффициента менее $9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, кварц – $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$). Пренебрегая изменением объема термометра, получим функцию преобразования длины в температуру:

$$T - T_0 = \frac{S}{\gamma \cdot V_0} \cdot (l - l_0), \quad (1.8)$$

На основании функции преобразования (7) и экспериментальных коэффициентов теплового расширения на капилляр наносят шкалу в единицах измерения температуры.

Жидкостные термометры не дорогие, просты в эксплуатации и не требуют дополнительного источника энергии. Основными ограничениями работы термометров являются:

- медленная скорость измерения, так как для выравнивания температур тела и жидкости в термометре необходимо дополнительное время;

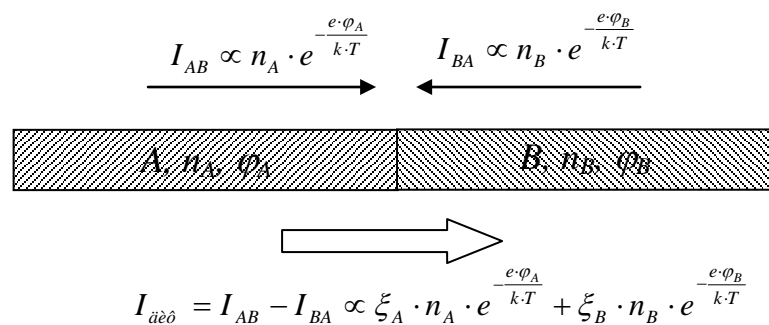
- сильное влияние на измеряемую величину, так как для нагрева рабочей жидкости тепло отбирается от объекта исследования.

Ртутные термометры используют в диапазоне от – 30 до 600 °С, спиртовые начиная от – 60 °С до температуры кипения спирта.

Термоэлектрические преобразователи

Наиболее распространенными устройствами измерения температуры объектов в промышленности являются термоэлектрические преобразователи (термопары).

Работа термопары основана на эффекте Зеебека: *в замкнутой электрической цепи из разнородных материалов (металлов, полупроводников) возникает термоэлектрическая движущая сила (термо-ЭДС), если места контактов поддерживаются при разных температурах.* Термо-ЭДС зависит только от разности температур и свойств материалов, образующих термопару, и может достигать 50 мкВ/°С в металлах, $10^2 \div 10^3$ мкВ/°С в полупроводниках.



e – заряд электрона, Кл;

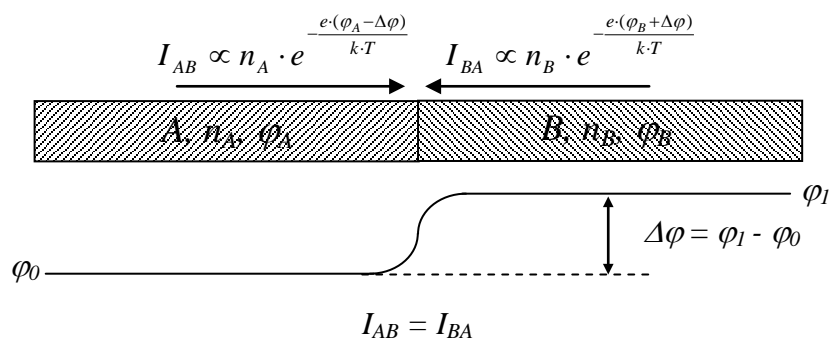
$e \cdot \varphi_A, e \cdot \varphi_B$ – работа выхода из материала A и B , соответственно, Дж;

n_A, n_B – концентрация электронов в материале A и B , соответственно, $1/\text{м}^3$.

Рисунок 1.5 – Возникновение диффузионного потока электронов на границе двух разнородных материалов

Все кристаллические тела характеризуются определенной концентрацией и работой выхода электронов – минимальной энергией, которой должен обладать свободный носитель заряда для преодоления потенциального барьера и выхода за пределы кристалла. Различие этих физических параметров приводит к возникновению не скомпенсированного теплового диффузионного потока электронов из одного материала в другой – I_{diff} (рисунок 5).

Диффузионный ток заряжает один материал положительно, а другой отрицательно. Возникающая контактная разность потенциалов препятствует прохождению не скомпенсированной части потока свободных носителей заряда (рисунок 6).



φ_0, φ_1 – потенциал материала A и B , соответственно, В;

$\Delta\varphi$ - разность потенциалов на границе материалов, В.

Рисунок 1.6 – Возникновение контактной разности потенциалов на границе двух разнородных материалов

Используя равенство потоков свободных носителей зарядов слева и справа от границы: $I_{AB} = I_{BA}$, найдем значение контактной разности потенциалов:

$$\Delta\varphi = \frac{k \cdot T}{2} \cdot \ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right) - \frac{e \cdot (\varphi_B - \varphi_A)}{2}, \quad (1.9)$$

В замкнутой цепи из двух разнородных материалов, находящихся в термодинамическом равновесии друг с другом ($T_{AB} = T_{BA}$), так же возникает разность потенциалов в местах контакта проводников (рисунок 7). Однако суммарная разность потенциалов по всему составному проводнику скомпенсирована и, следовательно, электродвижущая сила равна нулю:

$$\varepsilon = \Delta\varphi_{AB} + \Delta\varphi_{BA} = 0, \quad (1.10)$$

где ε - электродвижущая сила, В.

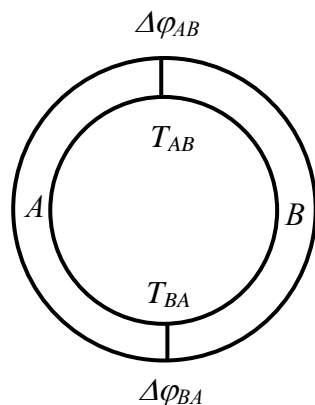


Рисунок 1.7 – Замкнутая цепь из разнородных материалов A и B

При нарушении термодинамического равновесия ($T_{AB} \neq T_{BA}$), в месте контакта AB разность потенциалов отличается от разности потенциалов в месте контакта BA и, следовательно, возникает электродвижущая сила, называемая термо-ЭДС:

$$\varepsilon_T = \frac{k \cdot (T_{AB} - T_{BA})}{2} \cdot \ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right), \quad (1.11)$$

Таким образом, термопара позволяет преобразовать разность температур контактов в прямо пропорциональную ей вычитаемую физическую величину – электрическое напряжение. Возможны две схемы измерения температуры с помощью термопары.

В первом случае термопары состоят из трех соединенных последовательно проводников. Два крайних проводника одинаковые, третий – центральный выполнен из другого материала. Крайние проводники подсоединяются к вольтметру, показания которого зависят от разности температур в местах соединения крайних проводников с центральным.

Во втором случае два разнородных проводника соединены с одной стороны, а их противоположные концы присоединяются к прибору, измеряющему электрическое напряжение. Соединение проводников помещается в место измерения температуры. При этом возникающая в цепи электродвижущая сила зависит от разности измеряемой температуры и температуры окружающей среды, так как роль второго контакта выполняют места соединения термопары с прибором.

Обычно в термопаре спай, подверженный воздействию измеряемой температуры, называется горячим спаем, а спай, находящийся при постоянной, эталонной температуре – холодным спаем.

Термопары, как правило, применяются для измерения больших перепадов температур. В зависимости от используемых материалов они позволяют измерять температуры в диапазоне от – 200 до 1700 °С.

Термисторы

В терморезистивных преобразователях (термисторах) используется свойство проводников или полупроводников менять свое сопротивление при изменении температуры. В качестве материала чувствительного элемента обычно используют из металлов: медь, никель, железо, платину; из полупроводников: хлориды и карбиды, оксиды, бор, кремний и другие материалы.

В узком температурном диапазоне (0 – 100 °С) сопротивление металлов с небольшой погрешностью можно считать линейной функцией температуры (рисунок 8):

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (1.12)$$

где ρ , ρ_0 – удельные сопротивления, соответствующие температурам T и T_0 , Ом/м;
 α – температурный коэффициент сопротивления, 1/К.

↑
 ρ

—————
 $T \rightarrow$

Рисунок 1.8 – Зависимость сопротивления меди ρ от абсолютной температуры T

Температурный коэффициент сопротивления определяет относительное изменение сопротивления при изменении температуры на 1 °С. Для металлов коэффициент является положительной величиной ($\alpha \approx 0,004$ 1/°С), то есть с ростом температуры сопротивление металлов возрастает. Это объясняется увеличением амплитуды теплового колебательного движения ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, что приводит к возрастанию числа столкновений свободных электронов с ионами. В результате уменьшается средняя скорость направленного движения носителей заряда - электронов.

Ом·м

↑
 ρ

°С

← T

Рисунок 1.9 – Зависимость проводимости полупроводника от температуры

Полупроводниковые терморезисторы состоят из поликристалла полупроводника, содержащего примеси хрома, марганца, железа, кобальта и никеля. По характеру зависимости

сопротивления от температуры термисторы делятся на преобразователи с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) и резисторы с отрицательным ТКС (ОТКС). Резисторы с ПТКС увеличивают сопротивление с увеличением температуры корпуса, а ОТК-резисторы, наоборот, уменьшают своё сопротивление с увеличением температуры. Отрицательный коэффициент в полупроводниках объясняется увеличением свободных носителей зарядов, переходящих в зону проводимости под действием температуры.

Зависимость сопротивления полупроводникового терморезистора от температуры можно описать следующей формулой:

$$R=A \cdot e^{B/T},$$

где A – постоянная для данного термистора, Ом

B – постоянная для данного термистора, 1/К.

Термисторы имеют следующие основные области применения:

- электронная компенсация в электронных цепях;
- ограничение пускового тока (двигатели, трансформаторы);
- задержка времени;
- измерение температуры (бытовая, автомобильная, промышленная электроника);
- регуляция и компенсация температуры.

Большинство термисторов обеспечивают линейную зависимость сопротивления от температуры лишь в узком интервале температур и, как правило, применяются при температурах до 125 °С.

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Определение коэффициента чувствительности термопары и термистора относительно ртутного термометра

1.1 Подготовьте для лабораторной работы нагревательный элемент, поместив его в воду (не включая) и сосуд со смесью воды и льда в соотношении 1:2.

1.2 Подсоедините термопару к вольтметру, находящегося в режиме измерения постоянного напряжения с верхним пределом 200 мВ.

1.3 Подсоедините термистор к омметру с верхним пределом измерения 100 Ом.

1.4 Поместите один спай термопары в сосуд со льдом, а второй спай в нагреваемую среду.

1.5 Установите ртутный термометр в нагреваемую воду.

1.6 Установите термистор в нагреваемую воду.

1.7 Включите нагревательный элемент.

1.8 Через каждые 5 °С фиксируйте показания термометра и вольтметра термопары, омметра термистора, заноса их в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Зависимость показаний ртутного термометра и термо-ЭДС от времени

Температура, °С									
Термо-сопротивление, Ом									
Термо-ЭДС, мВ									

1.9 Постройте экспериментальную зависимость термо-ЭДС от температуры. Проведите линейную аппроксимацию и определите чувствительность термопары.

1.10 Постройте экспериментальную зависимость сопротивления термистора от температуры. Проведите линейную аппроксимацию и определите чувствительность термопары.

1.11 Используя термистор, термопару и термометр расширения измерьте температуру собственного тела в разных точках. Зафиксируйте полученные результаты в виде схематического рисунка.

2. Определения характерных времен работы термопары и термометра на воздухе.

2.1 Доведите воду до кипения.

2.2 Извлеките термопару из нагревательного элемента. Через каждые 2 с фиксируйте показания вольтметра термопары, заноса их в таблицу 1.2.

2.3 Извлеките термометр из нагревательного элемента. Через каждые 2 с фиксируйте показания термометра, заноса их в таблицу 1.2.

2.4 Извлеките термистор из нагревательного элемента. Через каждые 2 с фиксируйте показания омметра, заноса их в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Зависимость показаний ртутного термометра и термо-ЭДС от времени

Время, с	0	2	4	6	8	...			
Термо-ЭДС, мВ									
Температура, °С									
Сопротивление, Ом									

2.5 Аппроксимируйте зависимости термо-ЭДС от времени и температуры от времени экспоненциальными функциями:

$$\varepsilon_T(t) = \varepsilon_{T_{\min}} + (\varepsilon_{T_{\max}} - \varepsilon_{\min}) \cdot e^{-\alpha t}, \quad (1.13)$$

$$T(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot e^{-\beta t}, \quad (1.14)$$

$$R(t) = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cdot e^{-\gamma t}, \quad (1.15)$$

2.6 Определите постоянные времени переходных процессов в воздухе для термопары $\tau_{mn} = 1/\alpha$, ртутного термометра $\tau_{mp} = 1/\beta$, термистора $\tau_{mc} = 1/\gamma$.

3. Определите характерных времена работы термопары и термометра в жидкости, повторив полностью пункт два, но поместив измерительные устройства в нагретую жидкость.

4. Сделайте вывод по проделанной работе, в котором отразите характеристики функции преобразования термопары и термистора, характерные времена переходных процессов при измерении температуры разными устройствами в жидкости и газе.

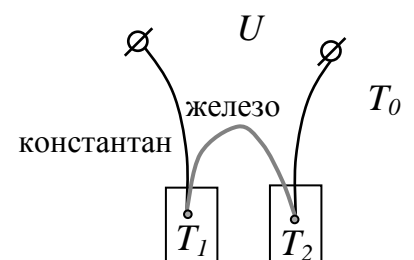
III КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. К какому типу шкал относится шкала физической величины температуры?
2. Какие типы шкал существуют?
3. В каких единицах измеряют температуру объекта, как они определяются?
4. Допустимо ли измерять температуру тела в единицах измерения энергии?
5. Перечислите первичные преобразователи температуры и их выходные сигналы?
6. В каких единицах измеряют чувствительность жидкостного термометра, термопары, термистора?
7. При измерении термопары получены следующие результаты измерения:

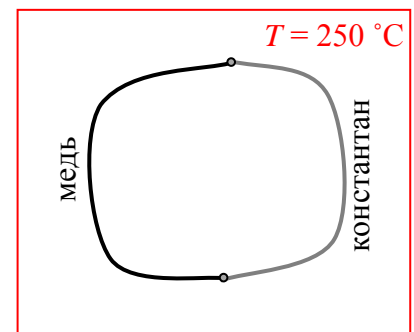
Температура, °C	20	80
Термо-ЭДС, мВ	5	9

Определите чувствительность термопары.

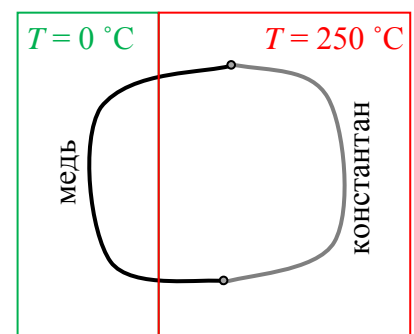
8. По какому закону между исследуемой средой и термометром устанавливается термодинамическое равновесие.
9. Рассмотрите влияние фундаментального свойства материи – «инерция» на примере измерения температуры
10. На основании проведенных экспериментов вычислите, во сколько раз характерные времена работы термопары и термистора отличаются от времени работы жидкостного термометра на воздухе.



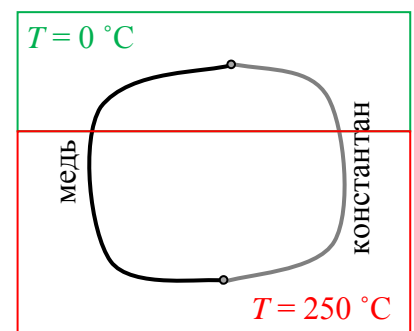
11. Чувствительность термопары железо-константан равна 53 мВ/К. Определите значение электрического напряжения U на выводах преобразователя, изображенного на рисунке. Температура в первом сосуде $T_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$, во втором сосуде $T_2 = 98\text{ }^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$.
12. Чему равна разность потенциалов в вопросе 11, если температуры в сосудах равны, а температура окружающей среды отличается от них: $T_1 = T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$, $T_0 = 80\text{ }^\circ\text{C}$.
13. Своими словами поясните, в чем заключается эффект Зеебека?
14. Что такое контактная разность потенциалов?
15. Поясните в чем отличие строения полупроводников и металлов?
16. Почему сопротивление проводников при увеличении температуры возрастает?
17. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры и почему?
18. После измерения температуры с помощью термопары, поясните как передается единица величины от эталонов к рабочим средствам измерения.
19. Входит ли единица градус Цельсия в Международную систему единиц.
20. Какая единица температуры входит в Международную систему единиц, она является основной или производной?
21. Дайте определение термину «основная единица»?
22. Какой преобразователь перспективно использовать в мобильных устройствах для измерения абсолютной температуры и почему?
23. Какой преобразователь перспективно использовать для измерения высоких температур (свыше $500\text{ }^\circ\text{C}$).
24. Проанализируйте эффект Зеебека для физических моделей, показанных на рисунках.



а)



б)



в)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: Определить экспериментальными методами характеристики фотодиода как первичного преобразователя световых величин

Решаемые задачи:

- 1) Определить зависимость фотоэлектрической движущей силы (фото-ЭДС) от освещенности фотодиода и сопротивления нагрузки в фотовольтаическом режиме работы.
- 2) Определить зависимость тока от освещенности фотодиода при различных значениях обратного напряжения в фотодиодном режиме.
- 3) Определить максимальную мощность фотодиода как источника тока.

Приборы, материалы и вспомогательные средства: фотодиод ФД-3, вольтметр, микроамперметр, омметр, электрическая лампа накаливания на 24 В, переменное сопротивление от 10 до 8000 Ом, блок питания постоянного напряжения от 0 до 10 В.

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Фотодиоды это полупроводниковые устройства, электрические параметры которых изменяются при воздействии на них света с длиной волны в видимой и инфракрасной областях спектра (0,3 – 2 мкм). Фотосопротивления, фототранзисторы, фототиристоры вместе с фотодиодами образуют класс детекторов излучения, работа которых основана на явлении внутреннего фотоэффекта, передаче энергии квантов света электронам вещества с изменением их энергетического состояния.

Фотоприемники такого типа нашли широкое применение в промышленности и быту. В качестве примера можно привести «солнечные батареи», которые находятся и в карманных калькуляторах, и в системах энергетического обеспечения космических станций. Солнечные батареи это фотоприемники, работающие в качестве источника напряжения, они преобразуют энергию квантов света в электрическую. Основным преимуществом такого вида энергии – относительная экологическая чистота, к основным недостаткам относятся: малая удельная мощность и отсутствие технологических процессов, позволяющих превзойти энергетические затраты на создание солнечной батареи над полной энергией вырабатываемой за все время эксплуатации.

В видеокамерах и цифровых камерах чувствительными элементами также являются полупроводниковые фотоприемники, которые переводят световое изображение предмета в электрический сигнал, поступающий затем в устройство хранения информации. Измерительная научная и промышленная аппаратура с детекторами на основе внутреннего

эффекта решает целый круг задач: измерение уровня освещенности, контроль геометрических размеров деталей, системы технического зрения, структуроскопия и дефектоскопия прозрачных материалов, бесконтактное измерение температуры и многое другое.

Для понимания принципов работы полупроводниковых фотоприемников необходимы знания строения и особенностей физики полупроводников.

Световые величины

Электромагнитные волны классифицируются по длине волны или связанной с ней частотой волны. Отметим также, что эти параметры характеризуют не только волновые, но и квантовые свойства электромагнитного поля. Спектром электромагнитных волн называется полоса частот электромагнитных волн, существующих в природе. Спектр электромагнитного излучения в порядке увеличения частоты составляют:

- Радиоволны;
- Инфракрасное излучение;
- Световое излучение;
- Рентгеновское излучение;
- Гамма излучение.

Различные участки электромагнитного спектра отличаются по способу излучения и приёма волн, принадлежащих тому или иному участку спектра. По этой причине, между различными участками электромагнитного спектра нет резких границ.

Инфракрасное и световое излучения.

Инфракрасное, световое, включая ультрафиолетовое, излучения составляют оптическую область спектра электромагнитных волн в широком смысле этого слова. Близость участков спектра перечисленных волн обусловило сходство методов и приборов, применяющихся для их исследования и практического применения. Исторически для этих целей применяли линзы, дифракционные решетки, призмы, диафрагмы, оптически активные вещества, входящие в состав различных оптических приборов (интерферометров, поляризаторов, модуляторов и пр.).

С другой стороны излучение оптической области спектра имеет общие закономерности прохождения различных сред, которые могут быть получены с помощью геометрической оптики, широко используемой для расчетов и построения, как оптических приборов, так и каналов распространения оптических сигналов. Оптический спектр занимает диапазон длин электромагнитных волн в интервале от $2 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 2 \text{ мкм}$ до $10^{-8} \text{ м} = 10 \text{ нм}$ (по частоте от $1.5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ до $3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$). Верхняя граница оптического диапазона определяется длинноволновой границей инфракрасного диапазона, а нижняя коротковолновой границей

ультрафиолета.

В оптической части спектра существенны явления, обусловленные атомистическим строением вещества. По этой причине наряду с волновыми свойствами оптического излучения проявляются квантовые свойства.

Электромагнитная природа света.

Свет представляет собой видимый участок спектра электромагнитных волн, длины волн которых занимают интервал от 0,4 мкм до 0,76 мкм. Каждой спектральной составляющей оптического излучения может быть поставлен в соответствие определённый цвет. Окраска спектральных составляющих оптического излучения определяется их длиной волны. Цвет излучения изменяется по мере уменьшения его длины волны следующим образом: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Красный свет, соответствующий наибольшей длине волны, определяет красную границу спектра. Фиолетовый свет - соответствует фиолетовой границе.

Естественный свет не окрашен и представляет суперпозицию электромагнитных волн из всего видимого спектра. Естественный свет появляется в результате испускания электромагнитных волн возбужденными атомами. Характер возбуждения может быть различным: тепловой, химический, электромагнитный и др. В результате возбуждения атомы излучают хаотическим образом электромагнитные волны примерно в течении 10^{-8} сек. Поскольку энергетический спектр возбуждения атомов достаточно широкий, то излучаются электромагнитные волны из всего видимого спектра, начальная фаза, направление и поляризация которых имеет случайный характер. По этой причине естественный свет не поляризован. Это означает, что "плотность" спектральных составляющих электромагнитные волны естественного света, имеющих взаимно перпендикулярные поляризации одинаково.

Введение в теорию полупроводников

Общепринято классифицировать материалы по значениям их электропроводности. Металлы обладают самым низким удельным электрическим сопротивлением $10^{-6} \div 10^{-4}$ Ом·м и, соответственно, наилучшей электропроводностью. Диэлектрики практически не проводят электрический ток, обладая самым высоким сопротивлением $10^6 \div 10^{15}$ Ом·м. Класс полупроводников является промежуточным, в него входят материалы с кристаллическим строением и значением удельного электрического сопротивления от 10^{-3} до 10^5 Ом·м.

Одно из следствий квантовой физики заключается в дискретности энергии электронов в кристалле. В материале могут существовать электроны только с определенными значениями энергии, которая зависит от химического состава и структуры кристалла (рисунок 1). В разрешенных энергетических зонах, приобретая или теряя энергию,

электроны беспрепятственно изменяют свое состояние.

Электрические свойства кристалла зависят от степени заполнения электронами последней разрешенной зоны кристалла и ширины запрещенной зоны. Рассмотрим возможные варианты заполнения энергетического спектра (рисунок 2).

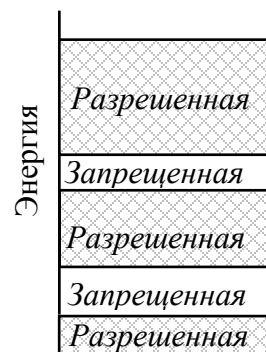


Рисунок 2.1 – Энергетическая зонная структура вещества

Диэлектрики. Последняя разрешенная зона заполнена электронами полностью и отделена от следующей разрешенной зоны достаточно широкой ($\Delta E > 2\div 3$ эВ) запрещенной зоной (энергетической щелью). Такая зона называется валентной, так как заполнена валентными электронами, привязанными к атомам вещества. Валентные электроны не способны перемещаться в веществе и, следовательно, участвовать в создании электрического тока. Кристаллы с таким строением называются диэлектриками.

Металлы. Последняя разрешенная энергетическая зона заполнена электронами не полностью. В результате теплового движения или ускорения в электрическом поле электроны способны свободно приобретать энергию в пределах разрешенной зоны. Следовательно, носители заряда могут свободно перемещаться по кристаллу и участвовать в создании электрического тока. Поэтому вещества с частично заполненной последней зоной хорошо проводят ток и называются металлами.

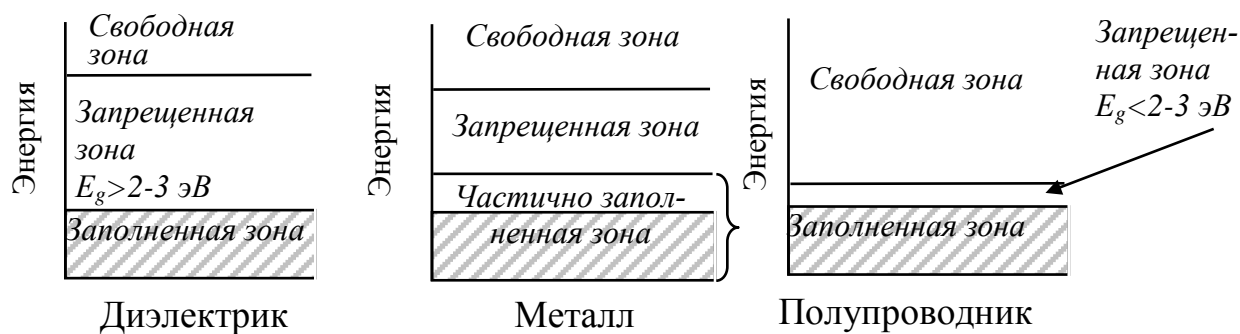


Рисунок 2.2 – Заполнение энергетических зон электронами

Полупроводники. Если последняя свободная зона заполнена полностью, но ширина запрещенной зоны меньше $2\div 3$ эВ, то кристалл называется полупроводником. Уже при комнатных температурах за счет тепловых флуктуаций заметное количество электронов ($10^8 - 10^{12}$ электрон/мм³) преодолевают энергетическую щель и переходят в следующую разрешенную зону. Эти электроны становятся свободными носителями зарядов, их называют электронами проводимости.

Когда электроны покидают полностью заполненную валентную зону, там образуются свободное для любого другого электрона состояние, которые называют вакансиями или «дырками». Процесс образования (генерация) и взаимного уничтожения (рекомбинация) свободных электронов и свободных состояний в полупроводнике протекает непрерывно. Когда валентный электрон с энергией соответствующей энергии «дырки» заполняет ее, перемещаясь из другого места кристалла, говорят, что перемещается «дырка». Таким образом, «дырки» способны передвигаться по полупроводнику, перенося при этом заряд противоположный заряду электрона – положительный заряд. В полупроводнике в создании электрического тока участвуют электроны и «дырки».

Проводимость полупроводников, обусловленную тепловыми электронами, перешедшими в свободную зону, и соответствующими им «дырками», называют собственной проводимостью. Естественно, что количество свободных электронов равно количеству свободных состояний.

Для повышения проводимости полупроводника применяют легирование – внедрение в основной кристалл атомов другого химического элемента. В зависимости от способности легирующего элемента образовывать химические связи с другими атомами (валентность), он добавляет в кристалл электроны с энергией отличной от энергии кристалла или создает дополнительные свободные энергетические состояния в веществе. Рассмотрим возможные варианты (рисунок 3).

Внедрение доноров (атомов с валентностью больше, чем валентность у атомов полупроводника) приводит к образованию в кристалле электронов с энергией близкой к верхней границы запрещенной зоны (рисунок 3б). Электроны с этого энергетического уровня за счет тепловой энергии почти полностью переходят в зону проводимости, становясь свободными. Соответственно проводимость повышается. Полупроводник, легированный донорами, называется полупроводником *n*-типа, его проводимость обусловлена в основном электронной компонентой.

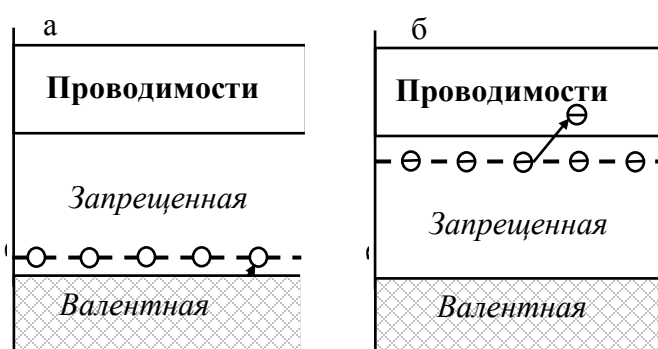


Рис. 2.3 – Энергетические зоны легированного полупроводника, а – акцепторами, б – донорами.

Внедрение атомов вещества (акцепторов) с меньшей валентностью, приводит к образованию разрешенных свободных состояний энергии вблизи нижней границы

запрещенной зоны. За счет тепловой энергии электроны заполняют эти состояния, переходя из валентной зоны. Это приводит к образованию в валентной зоне свободных носителей заряда – «дырок». Электропроводность такого кристалла будет обусловлена «дырками», которые перемещаются по полупроводнику под действием электрического поля и создают электрический ток. Полупроводник, легированный акцепторами, называют полупроводником *p*-типа.

Диод

Диод представляет собой полупроводник, в котором соприкасаются две области с различными типами проводимости (рисунок 4). Первая область *n*-типа легирована донорами, вторая область *p*-типа легирована акцепторами. Легирование повышает количество свободных носителей на $2 \div 6$ порядков, следовательно, электрические свойства областей различаются значительно.

Свободные носители зарядов участвуют в тепловом движении, поэтому на границе раздела полупроводников существуют потоки электронов и «дырок» (аналогично потокам молекул на стенки сосуда создающих давление газа). Электронов в *n*-области гораздо больше, чем в *p*-области и, следовательно, поток электронов слева значительно больше, чем справа от границы, а для «дырок» ситуация обратная (рисунок 5). Таким образом, электроны в результате диффузии переходят в *p*-область, заряжая ее отрицательно, а «дырки» в *n*-область заряжая ее положительно. В области *p-n* перехода возникает электрическое поле (рисунок 5), выравнивающее потоки свободных носителей заряда из *n*-области в *p*-область и из *p*-область в *n*-области. Это электрическое поле препятствует переходу электронов в *p*-область, «дырок» в *n*-область и, следовательно, направлено из *n* в *p*. Таким образом, в узкой области переходного слоя существует контактная разность потенциалов, связанная разностью концентраций свободных носителей заряда в соприкасающихся материалах и их тепловой диффузией.

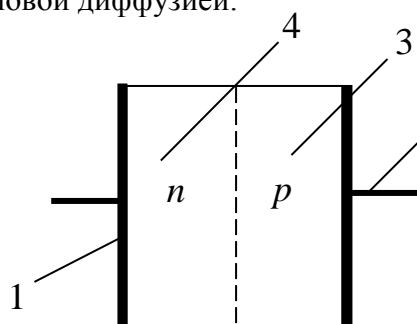


Рисунок 2.4 – Схема диода.
1 – металлические контакты, 2 – выводы, 3 – полупроводник *n*-типа, 4 – полупроводник *p*-типа.

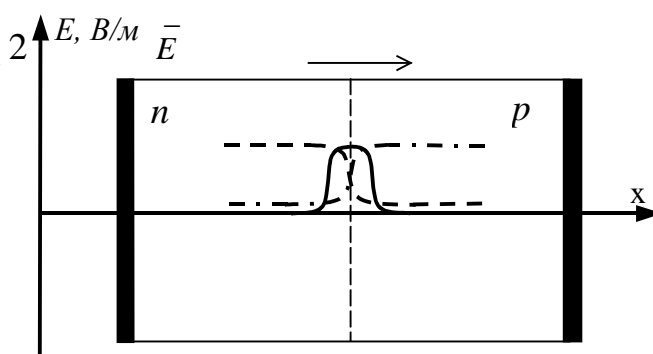


Рис. 5 Электрическое поле (—), концентрация свободных электронов (---) и дырок (---) вблизи от *p-n* перехода.

Рассмотрим два возможных направления внешнего электрического напряжения,

приложенного к электродам диода. Будем считать напряжение от внешнего источника на контактах диода положительным ($U > 0$), если внешнее поле направлено против внутреннего поля p - n перехода (рисунок 6а). В этом случае потенциальный барьер, препятствующий прохождению основных носителей через p - n переход, уменьшается. При увеличении внешнего напряжения ток возрастает экспоненциально.

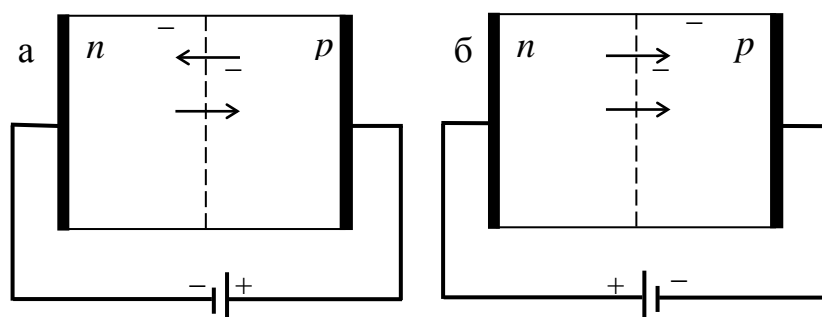


Рисунок 2.6 – Диод подключенный к источнику напряжения, стрелками указаны направления внутреннего E' и внешнего E полей.

При отрицательном напряжении на диоде от внешнего источника, контактная разность потенциалов увеличивается, основные носители не могут проникнуть через потенциальный барьер. Не основные носители: "дырки" в n -области и электроны в p -области свободно проходят через границу, ускоряясь в электрическом поле перехода. В этом случае электрический ток, протекающий по диоду, очень мал из-за небольшого количества не основных носителей.

Зависимость тока от напряжения (рисунок 7) для полупроводникового диода качественно описывается следующей зависимостью:

$$I = I_H \cdot \left(\exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_H – обратный ток насыщения, e – заряд электрона, U – напряжение на диоде, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

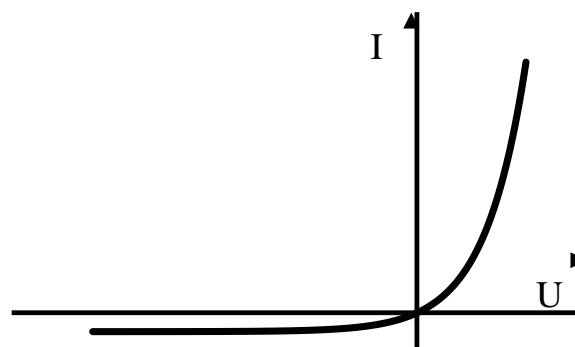
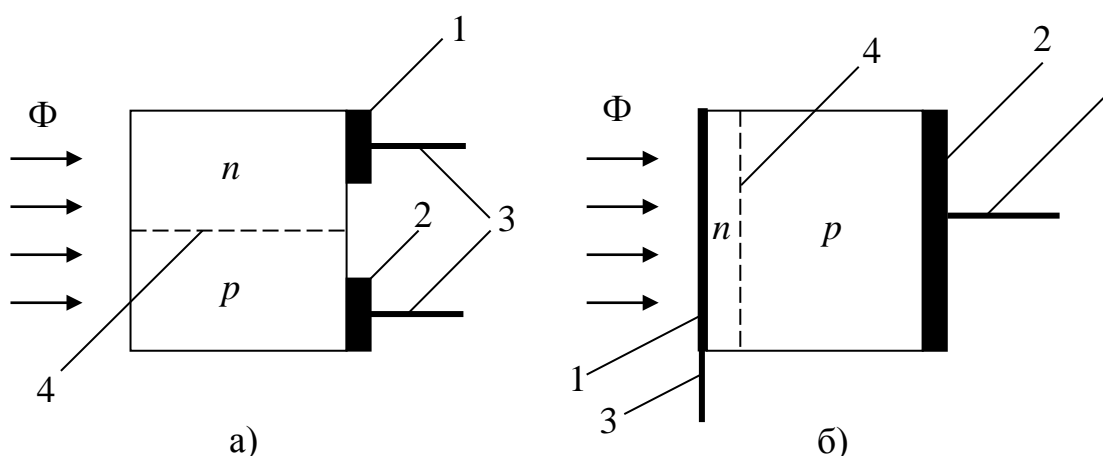


Рисунок 2.7 – Вольтамперная характеристика полупроводникового

В заключение отметим, что при положительном напряжении ток быстро возрастает, сопротивление диода мало и эквивалентно замкнутым проводам. При отрицательном значении напряжения, электрический ток значительно меньше, сопротивление диода можно считать бесконечным, и в электрической схеме он эквивалентен разрыву цепи.

Фотодиод

Фотодиод представляет собой диод с прозрачным окном, для прохождения оптического излучения непосредственно в область $p-n$ перехода (рисунок 8). Существуют два варианта исполнения фотодиода: с потоком излучения параллельным плоскости перехода и перпендикулярным ей. Во втором случае коэффициент преобразования энергии больше, поэтому он получил более широкое распространение. Что бы излучение беспрепятственно проходило в область $p-n$ -перехода, электрод входного окна выполнен в виде тонкой металлической пленки. Для понимания принципа работы фотодиода необходимо знание процессов происходящих в обычном диоде и знание закона внутреннего фотоэффекта.



1 – контакт n – области; 2 – контакт p – области; 3 – выводы; 4 – $p-n$ – переход.

Рисунок 2.8 – Принципиальные схемы фотодиодов: а) направление светового пучка параллельно плоскости $p-n$ – перехода; б) световой пучок и плоскость $p-n$ – перехода взаимно перпендикулярны;

Под действием света, падающего на поверхность полупроводника, электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости, при этом в валентной зоне образуются «дырки» (рисунок 9). Закон внутреннего фотоэффекта представляет собой закон сохранения: энергия поглощенного фотона передается электрону, который изменяет свое энергетическое состояние:

$$h \cdot \nu = E_K - E_H, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, ν – частота падающего света, E_H и E_K – начальная и конечная энергия электрона.

Если величина $(E_K - E_H)$ больше ширины запрещенной зоны, то электрон перейдет в зону проводимости. При этом образуются пара свободных носителя заряда: электрон и дырка. Поскольку их концентрация является неравновесной, то за время около 1 мкс они взаимоуничтожаются (рекомбинируют) на расстоянии 50 мкм от места рождения. Этого

времени оказывается достаточно, что бы в электрическом поле перехода возник ток из фотоэлектронов и дырок.

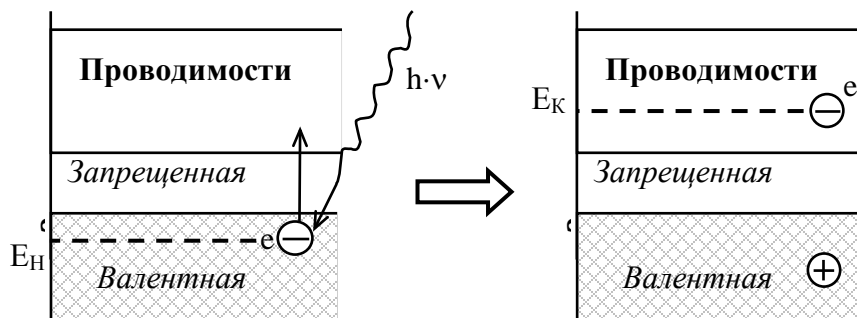


Рисунок 2.9 - Схема внутреннего фотоэффекта.

Если величина $(E_K - E_H)$ больше ширины запрещенной зоны, то электрон перейдет в зону проводимости. При этом образуются пара свободных носителя заряда: электрон и дырка. Поскольку их концентрация является неравновесной, то за время около 1 мкс они взаимоуничтожаются (рекомбинируют) на расстоянии 50 мкм от места рождения. Этого времени оказывается достаточно, что бы в электрическом поле перехода возник ток из фотоэлектронов и дырок.

Если на переход не подано внешнее напряжение и цепь разомкнута, то освещение приводит к накоплению фотоэлектронов в n -области и дырок в p -области. В результате образуется разность потенциалов U_ϕ , то есть появляется фото-э. д. с. Если внешняя цепь замкнута, возникает фототок. В таких условиях фотодиод работает как фотоэлемент.

Напряжение U_ϕ смещает переход в прямом направлении уменьшая высоту барьера для электронов и дырок. Вольтамперную характеристику p - n -перехода при освещении можно записать следующим образом:

$$I = I_H \left(e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi, \quad (3)$$

где I – ток во внешней цепи; I_H – ток насыщения через неосвещённый p - n -переход; e – заряд электрона; U – внешнее напряжение на p - n -переходе; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; I_ϕ – фототок, проходящий через переход.

На рисунке 10 показано семейство кривых построенных по формуле 3 при различных освещенностях перехода $\Phi_3 > \Phi_2 > \Phi_1 = 0$. При увеличении потока излучения вольтамперная характеристика фотодиода смещается вниз. При отсутствии освещения ($I_\phi = 0$) вольтамперная характеристика проходит через начало координат. Пересечение вольтамперных характеристик с осью токов (I) соответствуют режиму короткого замыкания (сопротивление во внешней цепи равно нулю) и называется фототоком, а пересечения с осью

напряжений (U) соответствует режиму холостого хода (сопротивление внешней цепи равно бесконечности) – фото-э. д. с.

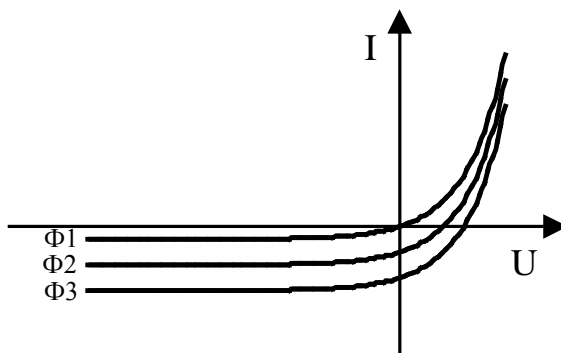


Рис. 2.10. Вольтамперные характеристики фотодиода при различных освещенностях p - n -перехода

Фотовольтаический режим

Фотодиод может включаться в электрическую измерительную схему двумя принципиально различными способами. Первый способ без внешнего источника питания называется фотовольтаическим режимом (рис. 11 а) работы фотоприемника, при этом измеряемой электрической величиной является фото-э. д. с., возникающая в p - n -переходе.

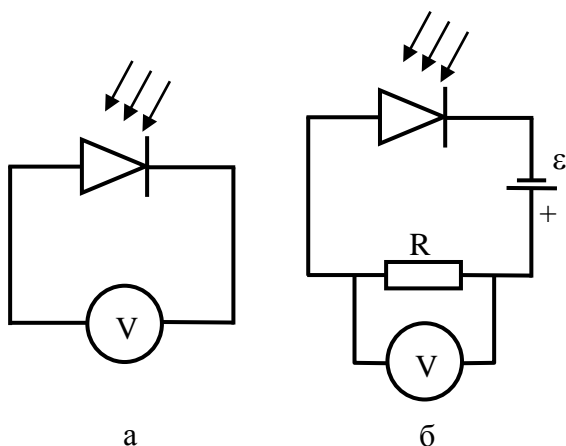


Рисунок 2.11 – Режимы включения фотодиода в измерительную схему, а – фотовольтаический, б – фотодиодный.

Рассмотрим зависимость напряжения на контактах фотодиода от интенсивности светового потока, для этого в формуле 3 приравняем ток во внешней цепи к нулю. Находим выражение для фото-э. д. с. ε_{Φ} :

$$\varepsilon_{\Phi} = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln \left(\frac{I_{\Phi} + I_H}{I_H} \right), \quad (4)$$

На рисунке 11 представлена зависимость фото-э. д. с. ε_{Φ} от величины освещенности Φ . Одна из причин по которой фотовольтаический способ включения не получил широкого

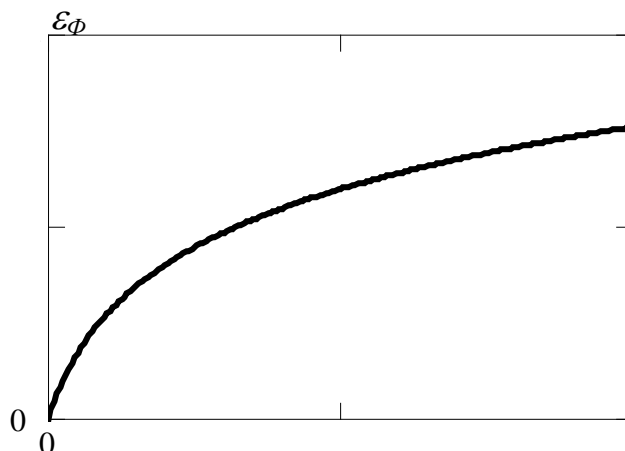


Рисунок 2.12 – Зависимость величины фото-ЭДС фотодиода от потока излучения.

распространения в измерительной технике это не линейная, а логарифмическая зависимость регистрируемого напряжения от интенсивности потока излучения. Достоинством такого режима работы фотодиода является возможность преобразования энергии света в электрическую энергию. Поэтому основная область применения фотовольтаического способа включения фотодиода это элементы питания.

Фотодиодный режим

В фотодиодном режиме фотоприемник-приемник подключается к источнику напряжения в обратном направлении (рис. 11 б), при этом измеряемой электрической величиной является ток через фотодиод. Зависимость тока через $p-n$ -переход от величины освещенности описываемая формулой 3, представлена на рисунке 13. Сопротивление R схема ограничивает ток через фотодиод при полном открытии. Положительной особенностью такой схемы измерения является слабая зависимость протекающего тока от напряжения питания (рис. 13.)

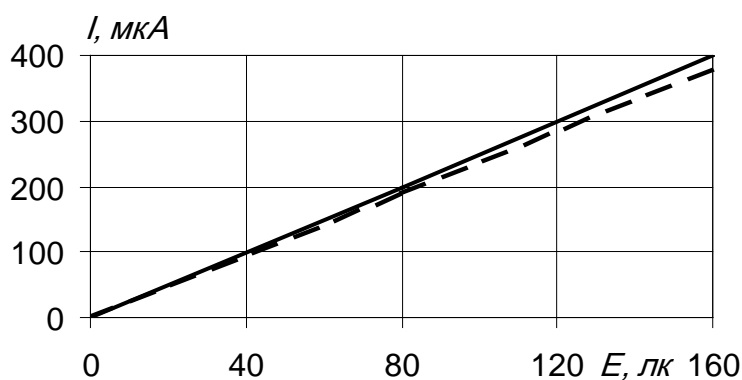


Рис. 2.13. Зависимость световой характеристики от приложенного к фотодиоду напряжения (сплошной линией при $U = 50$ В, штриховой при $U = 1$ В.

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Экспериментально исследовать зависимость фото-ЭДС от освещенности поверхности фотодиода без внешней нагрузки.

Установить стенд лабораторной работы таким образом, что бы на фотодиод не падал прямой солнечный свет и свет, отраженный от зеркальных и белых поверхностей.

Собрать схему представленную на рисунке 14. В качестве вольтметра использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с верхним пределом 100 – 500 мВ. Напряжение на лампу накаливания не подавать.

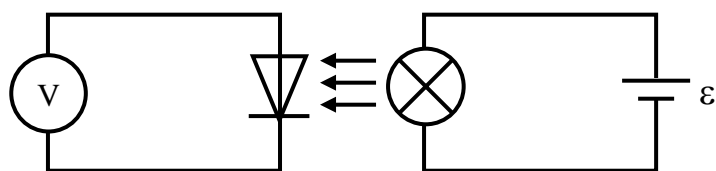


Рисунок 14 – Схема измерения фото-ЭДС без внешней нагрузки

Провести измерения фото-ЭДС ($\epsilon_{ест}$), вызванной естественным освещением на различных расстояниях L от лампы накаливания. Полученные экспериментальные данные занести в таблицу 1.

Установить фотодиод на расстояние $50 \div 60$ мм от нити накаливания. Включить лампу в сеть. Дождаться в течении 2 – 5 минут стабилизации показаний вольтметра. В дальнейшем при выполнении всей работы лампу не отключать.

Провести измерения фото-ЭДС без нагрузки ϵ_{ϕ} при различной степени освещенности, перемещая фотодиод на различные расстояния L от нити лампы накаливания. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Фотоэлектрическая движущая сила на фотодиоде, расположенном на различных расстояниях от лампы накаливания.

L , мм	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
$\epsilon_{ест}$, мВ												
ϵ_{ϕ} , мВ												

2.2 Экспериментально исследовать зависимость фото-ЭДС и фототок при постоянной освещенности поверхности фотодиода, но при различных значениях внешней нагрузки R .

Собрать схему представленную на рисунке 15. В качестве вольтметра использовать мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения с верхним пределом 100 – 500 мВ.

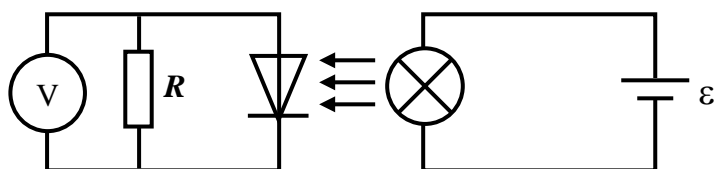


Рисунок 15 – схема измерения фото-ЭДС без внешней нагрузки

Установить значение сопротивления $R = 9$ кОм.

- разомкнуть цепь, отключив провода с фотодиода от одной клеммы сопротивления R .
- переключить мультиметр в режим измерения сопротивления;
- вращая регулятор переменного сопротивления и контролируя его значение с помощью мультиметра, установить необходимую величину сопротивления R .
- занести значение сопротивления R в первый столбец соответствующей строки таблицы 2.

Замкнуть цепь сопротивление – фотодиод; переключить мультиметр в режим измерения напряжения.

Провести измерения фото-ЭДС с нагрузкой $\epsilon_{\phi R}$. Данные занести в соответствующую ячейку таблицы 2.

Повторить измерения фото-ЭДС, уменьшая последовательно сопротивление нагрузки на 500 Ом. Результаты занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Фотоэлектрическая движущая сила и фото-ток на фотодиоде, с различной активной нагрузкой R .

$R, \text{кОм}$	9,0	8,5	8,0										
$\epsilon_{\phi R}, \text{мВ}$													
$I_{\phi R}, \text{мА}$													

2.3 Экспериментально исследовать вольтамперную характеристику фотодиода при различных значениях освещенности.

Собрать схему, представленную на рисунке 16.

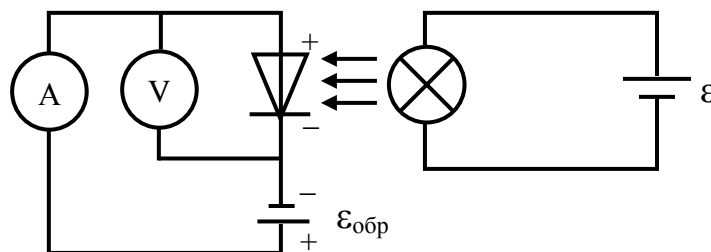


Рисунок 16 – Схема электрической цепи для измерения вольтамперной характеристики фотодиода

Установить фотодиод максимально далеко от лампы накаливания на расстоянии L .

Изменяя ступенчато обратное напряжение на фотодиоде $\epsilon_{обр}$, измерить протекающий в цепи фотодиода ток $I_{обр}$ и падение напряжения на фотодиоде $U_{обр}$. Полученные данные занести в таблицу 3.

Приближая фотодиод к источнику света, через каждые 20 – 30 мм повторить измерения вольтамперной характеристики в 4 – 5 точках. Полученные данные занести в таблицу 3.

Отключить все приборы и устройства. Практическая часть работы закончена.

Таблица 3 – Зависимость обратного тока через фотодиод ($I_{обр}$) от приложенного напряжения ($U_{обр}$) на различных расстояниях (L) от спирали лампы накаливания

L , мм	$U_{обр}$, В	0,1	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0	
	$I_{обр}$, мА												

III АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Определить значения параметров, характеризующих зависимость фото-ЭДС от освещенности поверхности фотодиода.

Занести экспериментальные зависимости фото-ЭДС (уменьшив на величину фото-ЭДС фона) от расстояния до источника света (таблицы 1 и 2) в электронную таблицу Excel.

Световой поток на фотодиоде обратно пропорционален расстоянию до источника света, следовательно, относительную освещенность входного окна фотодиода можно рассчитывать по формуле:

$$I = \frac{1}{L^2}, \quad (5)$$

где L – расстояние от фотодиода до спирали лампы накаливания, мм;

I – относительный световой поток на фотодиоде, отн. ед

Используя формулу (5) и формулу (4), аппроксимировать экспериментальную зависимость фото-ЭДС ϵ_{ϕ} от падающего светового потока I в относительных единицах. Определить численные значения аппроксимации.

Построить точечную диаграмму экспериментальной зависимости и полученной с помощью аппроксимации теоретической зависимости.

3.2 Зависимость мощности от сопротивления нагрузки

Используя экспериментальные данные практического задания №2, построить экспериментальную зависимость мощность фотодиода от сопротивления нагрузки. Определить максимальную мощность фотодиода как источника тока P_{max} и его внутреннее сопротивление. Определите сколько фотодиодов необходимо для работы лампы 220 В и 60 Вт.

3.3 Проанализировать экспериментальные вольтамперные характеристики фотодиода при различных значениях освещенности.

Построить графические зависимости тока от напряжения по таблице 3. Выберите и обоснуйте напряжение смещения для измерения освещенности с максимальным коэффициентом чувствительности.

Для данного сопротивления постройте зависимость относительной освещенности от обратного тока на фотодиоде, аппроксимируйте полученную зависимость прямой линией.

IV КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое диод?
2. Чем фотодиод отличается от диода?
3. Какие фотоприемники вы знаете.
4. Приведите классификацию электромагнитных волн?
5. Как классифицируют материалы по способности являться проводником электрического тока?
6. В чем особенность строения полупроводников?
7. Каких свободных носителей больше легированном полупроводнике p-типа?
8. Объясните, почему в полупроводнике n-типа одних носителей заряда больше чем других, хотя атомы донора электрически нейтральны?
9. Что возникает на границе полупроводников с разными концентрациями носителей?
10. Что такое внутренний фотоэффект?
11. Объясните схему подключения и принцип работы фотодиода в фотовольтаическом режиме.
12. Объясните схему подключения и принцип работы фотодиода в фотодиодном режиме.

13. В чем заключаются достоинства и недостатки фотовольтаического и фотодиодного режимов включения фотодиода?

13. Как изменится ВАХ фотодиода при его освещении?

14. Какие световые величины вы знаете?

15. В каких единицах измеряют световые величины?

16. Являются ли единицы световых величин производными, запишите их размерность.

17. Что такое контактная разность потенциалов?

18. Продолжите утверждение: «При увеличении освещенности фотодиода контактная разность потенциалов ..., так как»

19. Продолжите утверждение: «Фототок, протекающий в диоде пропорционален ...»

20. Поясните как фотодиод используется для измерения световых величин?

21. Определите чувствительность вашего фотодиода в различных схемах включения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

Цель работы: Измерить вязкость глицерина и машинного масла по методу Стокса.

Приборы, материалы и вспомогательные средства: секундомер, рулетка 1 м, сосуд высотой 1 м, набор стальных шариков, микрометр (0 – 25 мм), глицерин, машинное масло.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Вязкость (внутреннее трение) – физическая величина характеризующее свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Измерение вязкости жидкости имеет огромное практическое значение и используется для управления технологическими процессами в самых различных отраслях промышленности. Масла, используемые в машиностроении, должны обеспечивать достаточно низкую силу внутреннего трения и при этом обладать вязкостью, позволяющей удерживаться смазочным материалам между трущимися деталями продолжительное время. Даже незначительное отклонение вязкости краски от нормы в процессе печати тиража может вызвать заметное изменение цвета на оттиске. При изменении вязкости в большую сторону расход краски значительно увеличивается, что невыгодно по экономическим соображениям и часто приводит к увеличению времени высыхания и закрепления красочного слоя. Снижение вязкости увеличивает разбрызгивание краски в зоне контакта печатного вала, при этом быстрее загрязняется печатная форма.

Особыми вязкостными свойствами обладает, например, жидкий гелий. При температуре 2,172 К он переходит в сверхтекучее состояние, находясь в котором жидкость протекает через узкие щели и капилляры без трения; при этом протекающая часть жидкости обладает равной нулю энтропией.

Основной закон вязкого течения был установлен Ньютоном, в дифференциальной форме он выглядит следующим образом (рисунок 3.1):

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv(x)}{dx}, \quad (3/1)$$

где F — сила внутреннего трения, стремящаяся выровнять скорости жидкости, Н;

S — суммарная площадь слоев с градиентом скорости, м²;

$v(x)$ – скорость в слое, как функция координаты слоя, м/с;

$dv(x)/dx$ — градиент скорости, характеризующий изменения скорости от слоя к слою, 1/с;

η – динамическая вязкость, (Н·с)/м².

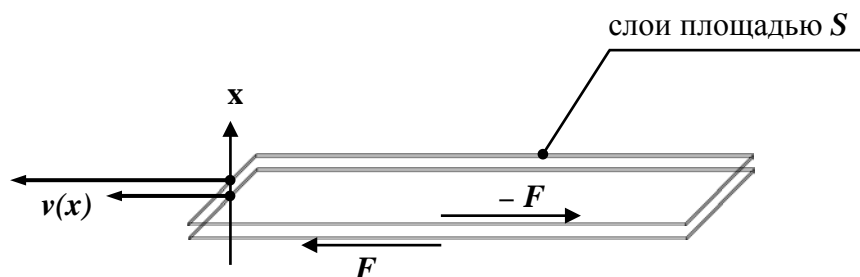


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение слоев жидкости площадью S с градиентом скорости $v(x)$ и силой внутреннего трения между слоями F

Из формулы (1) следует, что динамическая вязкость численно равна силе сопротивления параллельной скорости слоя (тангенциальная) и действующей на единицу площади слоя при градиенте скоростей 1 /c . Вместе с динамической вязкостью применяют так же кинематическую вязкость ν :

$$\nu = \eta / \rho, \quad (3.2)$$

где ρ — плотность жидкости или газа, кг/м^3 .

Единица динамической вязкости $(\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$, кинематической – $\text{м}^2/\text{с}$. В системе СГС для кинематической вязкости используется специальное название – *стокс*:

$$1 \text{ стокс} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (3.3)$$

В случае установившегося слоистого течения без вихревых образований (ламинарные течения) вязкость имеет постоянное значение, зависящее от температуры и химического состава газа или жидкости, и не зависящее от градиента скорости (таблица 1).

Таблица 3.1 – Значения вязкости для некоторых веществ в нормальных условиях

Вещество	Вязкость $10^{-3} \cdot (\text{Н}\cdot\text{с})/\text{м}^2$
ацетон	0,325
азот	0,0175
вода	1,002
глицерин	1500
ртуть	1,554
спирт этиловый	1,200

Ламинарное течение (от лат. *lamina* — пластинка) это упорядоченное течение жидкости или газа, при котором вещество перемещается слоями, параллельными направлению течения (рисунок 2а). Обычно ламинарное течение наблюдается или у очень вязких жидкостей, или при течениях с достаточно малыми скоростями и при медленном обтекании твердых тел относительно малых размеров. Например, ламинарные течения образуются в капиллярных трубках, в тонком слое смазки в подшипниках, вблизи поверхности тел при обтекании их жидкостью или газом. С

увеличением скорости движения жидкости упорядоченное слоистое течение, переходит в неупорядоченное турбулентное течение (рисунок 2б). При этом резко изменяется сила сопротивления движению, которая теперь определяется вихревым движением, смешивающим слои жидкости или газа с различными скоростями течения. Режим течения жидкости классифицируют по одному из критериев подобия – числу Рейнольдса Re .

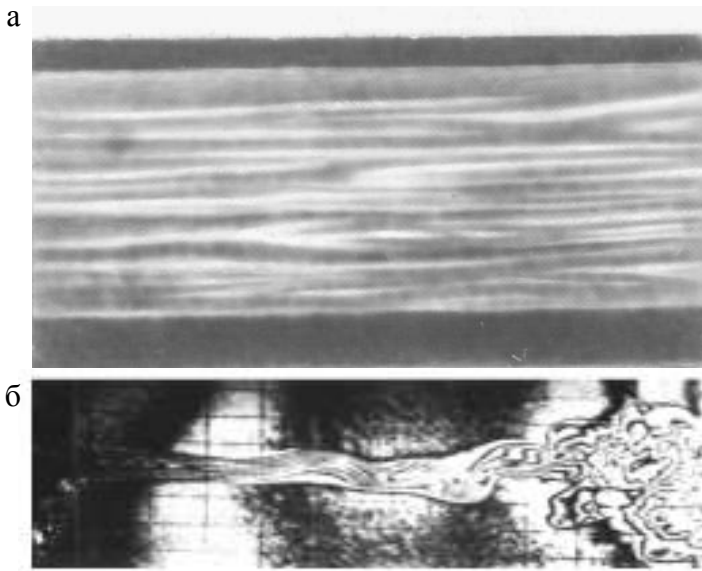


Рисунок 3.2 – Фотография ламинарного (а) и турбулентного (б) потоков жидкости

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta}, \quad (3.4)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ;

η — динамическая вязкости жидкости или газа, $(\text{Н} \cdot \text{с})/\text{м}^2$;

v — характерная скорость потока, м/с ;

l — характерный линейный размер изменения скорости, м .

От числа Рейнольдса зависит режим течения жидкости, характеризуемый критическим числом $Re_{кр}$. При $Re \leq Re_{кр}$ возможно лишь ламинарное течение жидкости, а при $Re > Re_{кр}$ течение становится турбулентным. Значение $Re_{кр}$ зависит от вида течения:

- для вязкой жидкости в круглой цилиндрической трубке постоянного радиуса $Re_{кр} = 2300$;

- для гладкого цилиндра обтекаемого жидкостью $Re_{кр} = 10$.

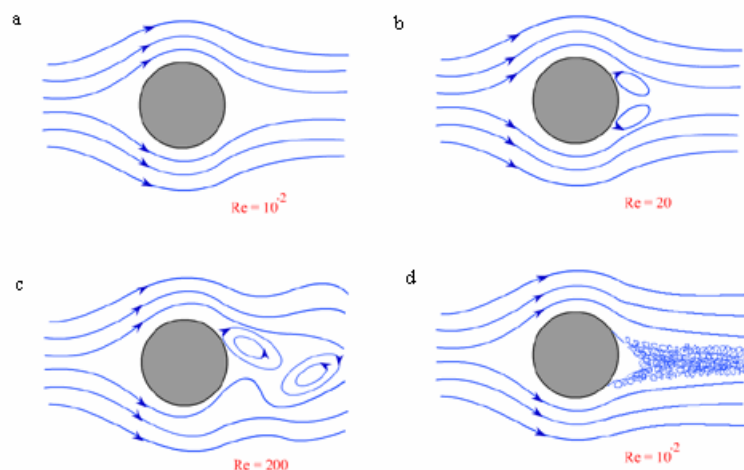


Рисунок 3.3 – Обтекание цилиндра вязкой жидкостью при различных значениях числа Рейнольдса

В дальнейшем мы будем рассматривать ламинарное течение, в котором вязкость является постоянной величиной зависящей только от химического состава и температуры.

Молекулярно-кинетическая теория объясняет вязкость движением и взаимодействием молекул. В газах расстояния между молекулами существенно больше радиуса действия молекулярных сил, поэтому вязкость газов определяется главным образом молекулярным движением. Между движущимися относительно друг друга слоями газа происходит постоянный обмен молекулами, обусловленный их непрерывным хаотическим (тепловым) движением. Переход молекул из одного слоя в соседний, движущийся с иной скоростью, приводит к переносу от слоя к слою определённого количества движения. В результате медленные слои ускоряются, а более быстрые замедляются. Работа внешней силы F , уравнивающей вязкое сопротивление и поддерживающей установившееся течение, полностью переходит в тепло.

Вязкость газа не зависит от его плотности (давления), так как при сжатии газа общее количество молекул, переходящих из слоя в слой, увеличивается, но зато каждая молекула менее глубоко проникает в соседний слой и переносит меньшее количество движения (закон Максвелла). Для вязкости идеальных газов в молекулярно-кинетической теории даётся следующее соотношение:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot m \cdot n \cdot \bar{u} \cdot \lambda, \quad (3.5)$$

где m — масса молекулы, кг;

n — концентрация молекул, $1/\text{м}^3$;

\bar{u} — средняя скорость молекул, м/с;

λ — средняя длина свободного пробега, м.

Так как средняя скорость теплового движения молекул возрастает с повышением температуры T , то вязкость газов увеличивается при нагревании пропорционально \sqrt{T} .

В жидкостях, где расстояния между молекулами значительно меньше, чем в газах, вязкость обуславливается уже межмолекулярными дальнедействующими силами, которые ограничивают подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нём полости, достаточной для перескакивания туда молекулы. На образование полости (на «рыхление» жидкости) расходуется так называемая энергия активации вязкого течения. Энергия активации уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения внутреннего трения жидкостей с повышением температуры и роста её при высоких давлениях. При повышении давления до нескольких тысяч атмосфер вязкость увеличивается в десятки и сотни раз. Строгая теория вязкости жидкостей в настоящее время ещё не создана. На практике широко применяют ряд эмпирических и полуэмпирических формул вязкости, достаточно хорошо отражающих зависимость вязкость отдельных классов жидкостей и растворов от температуры, давления и химического состава.

Вязкость жидкостей зависит от химической структуры их молекул. В рядах сходных химических соединений (насыщенные углеводороды, спирты, органические кислоты и т.д.) внутреннее трение изменяется закономерно — возрастает с возрастанием молекулярной массы. Высокая динамическая вязкость смазочных масел объясняется наличием в их молекулах длинных циклических соединений. Две жидкости с различной вязкостью, которые не реагируют друг с другом при смешивании, обладают в смеси средним значением. Если же при смешивании образуется новое химическое соединение, то внутреннее трение смеси может измениться в десятки и тысячи раз.

Возникновение в жидкостях пространственных структур, образуемых сцеплением частиц или макромолекул, вызывает резкое повышение вязкости. При течении «структурированной» жидкости работа внешней силы затрачивается не только на преодоление сил сопротивления ньютоновской жидкости, но и на разрушение структуры.

Для нормальных вязких жидкостей между количеством протекающей в единицу времени жидкости через капилляр, и давлением существует прямая пропорциональность (закон Пуазеля):

$$Q = \frac{\pi}{128 \cdot \eta} \cdot \frac{\Delta P}{l} \cdot d^4, \quad (3.6)$$

где Q – поток жидкости, объем жидкости, проходящей через поперечное сечение трубы за единицу времени, м³/с;

ΔP – разность давления на входе и выходе трубы, Па;

l – длина трубы, м;

d – диаметр трубы, м;

η – динамическая вязкость, (Н·с)/м²;

Для измерения вязкости жидкости используют специальные приборы – вискозиметры (от позднелатинского *viscosus* — вязкий и метр), основанные на связи вязкости с измеряемыми физическими величинами, описывающими различные физические процессы: движение жидкости в капиллярах, передача жидкостью вращательно момента от одной поверхности к другой, падения шарика вязкости, распространения ультразвуковых колебаний.

Определение вязкости капиллярным вискозиметром основано на законе Пуазейля (формула 6) состоит в измерении времени протекания известного объема жидкости или газа через тонкие трубки круглого сечения (капилляры) при заданном перепаде давления. Капиллярными вискозиметрами измеряют вязкость от 10^{-5} (Н·с)/м² (газы) до 10^4 (Н·с)/м² (консистентные смазки). Относительная погрешность образцовых капиллярных приборов $\pm 0,1$ — $0,3\%$, рабочих приборов $\pm 0,5$ — $2,5\%$. На рисунке 4 показаны устройства различных типов стеклянных вискозиметров.

В капиллярных вискозиметрах указанных типов течение жидкости происходит под действием силы тяжести (в начальный момент уровень жидкости в одном колене В. выше, чем в другом). Время опорожнения измерительного резервуара определяют как промежуток между моментами прохождения уровня жидкости мимо меток на верхних и нижних концах резервуара. В капиллярных автоматических вискозиметрах (непрерывного действия) жидкость поступает в капилляр от насоса постоянной производительности. Перепад давления на капилляре, измеряемый манометром, пропорционален искомой вязкости.

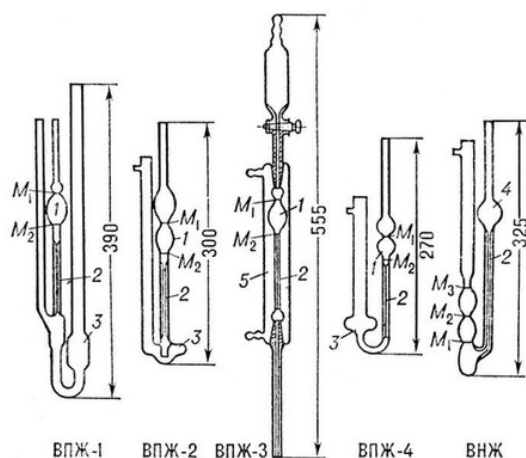


Рисунок 3.4 – Стеклянные капиллярные вискозиметры (ГОСТ 10028—67): 1 — измерительные резервуары; 2 — капилляры; 3 — приемные сосуды; 4 — питающий резервуар (в

вискозиметрах для непрозрачных жидкостей ВНЖ); 5 — термостатирующая рубашка; M_1 , M_2 (у ВНЖ также M_3) — метки, служащие для измерения времени истечения жидкости из измерительных резервуаров или их заполнения (у ВНЖ).

В ротационных вискозиметрах исследуемая вязкая среда находится в зазоре между двумя соосными телами (цилиндры, конусы, сферы, их сочетание), причём одно из тел (ротор) вращается, а другое неподвижно. Вязкость определяется по крутящему моменту при заданной угловой скорости или по угловой скорости при заданном крутящем моменте. Ротационные устройства применяют для измерения вязкости смазочных масел (при температурах до -60 °С), нефтепродуктов, расплавленных силикатов и металлов (до 2000 °С), высоковязких лаков и клеев, глинистых растворов и т.д. Относительная погрешность наиболее распространённых ротационных вискозиметров лежит в пределах от 3 до 5%.

На рисунке 5 показано устройство ротационного устройства РВ-7 (пределы измерений от 1 до 10^5 Н·сек/м², погрешность $\pm 3\%$). Работа вискозиметра основана на измерении момента силы возникающего в слое жидкости заключенном между внутренним вращающимся цилиндром (1) и внешнем неподвижном цилиндре. Для вращения цилиндра используется груз (11), соединенный с ним через систему: нить (9), блок (10) и шкив (7). Момент сопротивления рассчитывают по скорости вращения шкива.

Для измерения вязкости при различных температурах прибор помещен в термостат (4) с мешалкой (5), контроль температуры исследуемой жидкости осуществляют с помощью термопар (6).

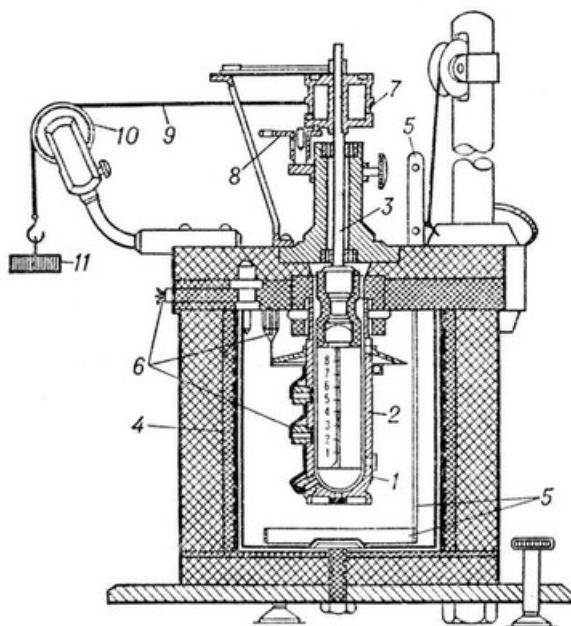
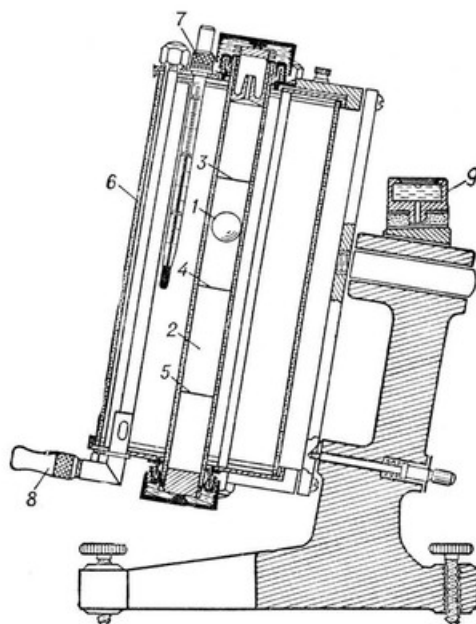


Рисунок 3.5 – Ротационный вискозиметр РВ-7 с заданным крутящим моментом

Действие ультразвуковых вискозиметров основано на измерении скорости затухания колебаний в пластинке из магнитострикционного материала, погруженной в исследуемую среду. Колебания возникают от коротких (длительность $10 \div 30$ мкс) импульсов тока в катушке, намотанной на пластинку. Колебания пластинки вызывают обратный магнитострикционный эффект: в катушке возникает электродвижущая сила (ЭДС). Амплитуда колебаний пластинки убывает со скоростью, зависящей от вязкости среды. При уменьшении ЭДС в катушке до некоторого порогового значения в катушку поступает новый возбуждающий импульс. Вязкость среды определяют по частоте следования импульсов: чем больше вязкость среды, тем быстрее затухают колебания и, следовательно, выше частота автоциркуляции. Ультразвуковыми вискозиметрами измеряют вязкость в диапазоне от 10^{-3} до 500 (Н·с)/м² с относительной погрешностью 5%.

Помимо вискозиметров, позволяющих выразить результаты измерений в единицах динамической или кинематической вязкости, существуют приборы и устройства для измерения вязкости жидкостей в условных единицах. Такой вискозиметр представляет собой сосуд с калиброванной сточной трубкой; вязкость оценивается по времени истечения определённого объёма жидкости. Например, с помощью устройств типа ВЗ-1 и ВЗ-4, предназначенных для исследования лаков и красок, вязкость выражают в секундах, а с помощью приборов типа ВУ (Энглера) для нефтепродуктов — в градусах Энглера. Перевод условных единиц в единицы вязкости СИ (Н·с)/м² возможен, но неточен.



1 — шарик; 2 — трубка с жидкостью; 3, 4, 5 — кольцевые метки на трубке; 6 — термостатирующая жидкостная баня; 7 — термометр; 8 — штуцер для присоединения прибора к термостату; 9 — уровень

Рисунок 3.6 – Вискозиметр Гепплера со «скользящим» шариком:

Действие вискозиметров с движущимся в исследуемой среде шариком основано на законе Стокса, вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке устройства. К приборам этого типа относится широко распространённый универсальный вискозиметр Гепплера со «скользящим» шариком (рисунок 6). Пределы измерений устройств этого типа от $6 \cdot 10^{-4}$ до $250 \text{ (Н}\cdot\text{с)/м}^2$ с относительной погрешностью $\pm 1\text{—}3\%$.

Рисунок 6 – Вискозиметр Гепплера со «скользящим» шариком: 1 — шарик; 2 — трубка с жидкостью; 3, 4, 5 — кольцевые метки на трубке; 6 — термостатирующая жидкостная баня; 7 — термометр; 8 — штуцер для присоединения прибора к термостату; 9 — уровень

В настоящей работе вам необходимо исследовать метод определения вязкости глицерина по методу падающего тела. Закон Стокса определяет силу сопротивления F , испытываемую твёрдым шаром при его медленном равномерном поступательном движении в неограниченной вязкой жидкости:

$$F_C = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (3.7)$$

где η – динамическая вязкость жидкости, $(\text{Н}\cdot\text{с)/м}^2$;

r – радиус шара, м;

v – равновесная скорость шара, м/с.

Эта формула выведена Дж. Г. Стоксом в 1851. и справедлива лишь для малых чисел Рейнольдса $Re \leq 1$. Им пользуются в коллоидной химии, молекулярной физике и метеорологии.

В поле силы тяжести Земли для шарика радиуса r с плотностью материала ρ должна существовать равновесная скорость, при которой сила тяжести F_T , архимедова сила F_A и сила сопротивления жидкости уравниваются друг друга. Для

$$F_D = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_\phi \cdot g, \quad (3.8)$$

$$F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_e \cdot g, \quad (3.9)$$

где $\rho_{ш}$ – плотность материала шарика, кг/м^3 ;

$\rho_{ж}$ – плотность материала жидкости, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$.

Равновесная скорость шарика в среде соответствует нулевому значению ускорения, тогда II закон Ньютона в проекции на вертикальную ось примет следующий вид:

$$F_T - F_A - F_C = 0, \quad (3.10)$$

Подставив в формулу 10 выражения 7, 8 и 9, после несложных преобразований получим равновесную скорость шарика в вязкой жидкости:

$$v_{\delta} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot g \cdot (\rho_{\phi} - \rho_{\kappa})}{\eta}, \quad (3.11)$$

Таким образом в вязкой жидкости в поле силы тяжести шарик сначала движется равноускоренно до достижения равновесной скорости (формула 11), а затем равномерно. При этом скорость равномерного движения обратно пропорциональна вязкости жидкости, что позволяет проводить косвенные измерения коэффициента динамической вязкости.

Для справки: плотность глицерина 1260 кг/м³

плотность стали 7700 кг/м³

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Подготовить два сосуда с глицерином и машинным маслом
2. Нанести маркером на сосудах две отметки для определения:
 - первую на расстоянии 200 – 300 мм от верхней границы жидкости;
 - вторую вблизи дна сосуда.
3. Рулеткой измерить расстояние между отметками, занести результат в протокол лабораторной работы.
4. Измерить микрометром диаметр шарика.
5. Измерить на весах массу шарика.
6. Бросив шарик в глицерин с высоты 10 – 20 мм, измерить секундомером время его движения между отметками на сосуде.
7. Занести результат в таблицу 2.

Таблица 2 – Экспериментальные значения диаметра шарика и времени движения между отметками на сосуде с глицерином

Измеряемая величина	Глицерин									
Расстояние между метками, м										
Диаметр шарика, d , м										
Время, Δt , с										

7. Повторяя действия пунктов 4 и 7 для 10 – 15 стальных шариков разного размера полностью заполнить таблицу 2
8. Извлеките шарик из глицерина.
9. Повторите действия пунктов 4 – 7 для масла и заполните таблицу 3.

Таблица 3 – Экспериментальные значения диаметра шарика и времени движения между отметками на сосуде с маслом

Измеряемая величина	Машинное масло										
Расстояние между метками, м											
Диаметр шарика, d , м											
Время, Δt , с											

10. Внесите полученные данные в электронные таблицы

11. Постройте зависимости скорости движения шарика от его квадрата радиуса $-r^2$ для масла и глицерина.

12. Методом наименьших квадратов получите коэффициенты линейной аппроксимации для глицерина и масла уравнения:

$$v = \alpha \cdot r^2 + \beta, \quad (3.12)$$

13. Используя, полученные экспериментальные значения коэффициентов и уравнение (3.12) определите вязкости исследуемых жидкостей.

III КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Является ли вязкость физической величиной?
2. В чем причины возникновения аэродинамического следа за обтекаемым телом?
3. Как изменяется величина скорости газа в пределах пограничного слоя вдоль нормали к поверхности обтекаемого тела?
4. Чем характеризуются турбулентный поток?
5. Чем характеризуется ламинарный поток?
6. Как определяется число Рейнольдса?
7. Рассчитайте для ваших экспериментов число Рейнольдса и сравните его с критическим. Интерпретируйте результаты расчетов.
8. Что такое критическое число Рейнольдса?
9. Определите размерность числа Рейнольдса?
10. Чем отличаются профили скоростей в ламинарном и турбулентном пограничных слоях?
11. Существует ли напряжение трения между слоями газа в потенциальном потоке?
12. Чему равно напряжение трения между слоями газа в потенциальном потоке?
13. Как установить плоскую пластину вдоль набегающего потока воздуха, что бы сопротивление воздуха было максимальным?

14. Дайте определение термину «вязкость».
15. Как и от каких параметров зависит сила сопротивления движению тела в вязкой среде?
16. Расскажите какие типы приборов для измерения вязкости существуют. Опишите их принцип действия и проанализируйте их достоинства и недостатки.
17. Для каждого вискозиметра укажите в какую величину преобразуется вязкость для измерения.
18. Вязкость является производной или основной величиной?
19. Стокс является производной или основной единицей?
20. Поясните, как в вашей лабораторной работе реализуется прослеживаемость единицы величины от эталонов к рабочим средствам измерений?
21. В чем разница между динамической и кинематической вязкостью?
22. В каких единицах измеряется динамическая и кинематическая вязкость?
23. Единицы измерения вязкости являются производными или основными? Составьте уравнение их размерности.
24. Что такое относительная погрешность?
25. Определите абсолютную погрешность ротационного вискозиметра при измерении вязкости глицерина, масла.
26. Определите абсолютную погрешность ультразвукового вискозиметра при измерении вязкости глицерина, масла.
27. Допустимо ли использовать рабочий капиллярный вискозиметр для измерения вязкости масла с кинематической вязкостью $(0,300 \pm 0,002) \text{ (Н}\cdot\text{с)/м}^2$?
28. Поясните какие единицы величин хранят и воспроизводят средства измерений, используемые в вашей лабораторной работе, и как они связаны с единицей вязкости.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: Исследовать характеристики первичных преобразователей магнитных величин

Решаемые задачи:

- 1) Определить функцию преобразования индуктивного преобразователя (катушки)
- 2) Определить зависимость коэффициента преобразования индуктивного преобразователя от частоты.
- 3) Определить функцию преобразования датчика Холла
- 4) Определить зависимость функции преобразования датчика Холла от частоты и тока питания.

Приборы, материалы и вспомогательные средства: индуктивный преобразователь, датчик Холла, генератор, осциллограф.

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В современной измерительной технике широко используются измерения характеристик магнитных полей, неразрывно связанных с движением электрических заряженных частиц.

Магнитные поля характеризуются следующим набором основных величин. Магнитная индукция (B) – параметр магнитного поля, характеризующий силу и направление магнитного поля в точке и измеряется в Тл. При этом точка пространства может быть занята каким либо материалом (например, воздух или металл) или быть в вакууме. Поэтому магнитная индукция складывается из двух составляющих: напряжённости поля (H) и намагниченности материала (M):

$$B = \mu_0(H + M), \quad (4.1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума равная $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), напряженность поля в точке характеризует поле, создаваемое его источником (например, постоянным магнитом, катушкой индуктивности или проводом по которому течёт ток) и находящимся на определенном расстоянии от источника, намагниченность же показывает насколько сильно намагничен материал данной точки пространства, обе последние величины измеряются в А/м. Но намагниченность материала зависит и от напряжённости приложенного поля и прямо пропорциональна ему:

$$M = \chi H, \quad (4.2)$$

где χ – коэффициент, называемый магнитной восприимчивостью материала. Тогда формулу (1) можно переписать выразив только через напряжённость поля:

$$B = \mu_0 H(1 + \chi), \quad (4.3)$$

а $1 + \chi$ называют относительной магнитной проницаемостью материала и выражают индексом μ .

Однако, следует помнить, что магнитное поле возникает вследствие движения заряженных частиц, что в простейшем случае можно представить в виде протекания тока по проводнику. И если в качестве такого проводника мы возьмём катушку с N количеством витков, то связь между током, протекающим по такому проводнику и напряжённостью магнитного поля в общем случае выражается через одно из уравнений Максвелла:

$$\oint_L H \cdot dl = i,$$

где L – линия замкнутого контура, включающая все витки катушки, dl – элемент дины контура, а i – полный ток, охватываемый контуром. Но для оси катушки имеется частное решение этого интеграла в виде:

$$H = \frac{IN}{2b} \cdot (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (4.4)$$

где b – длина катушки, I – сила протекающего по ней тока, а углы α_1 и α_2 представлены на рисунке 4.1.

Магнитное поле, как и другие поля, обладает качеством непрерывности, то есть магнитная индукция существует в каждой точке пространства, и его можно наблюдать в любой точке и для удобства характеристики пользуются гипотетическими линиями характеризующими одинаковое значение напряжённости поля в пространстве, вокруг источника поля. Такие линии называются *силовыми линиями*, часть из них представлена на рисунке 4.1.

Следует знать, что напряжённость в реальных условиях измерить невозможно, в некотором смысле – это виртуальная величина, но с ней удобнее работать. Оценить в точке пространства или материала можно только величину магнитной индукции, так как мы можем проводить измерение либо в какой-то среде (воздух, вода, металл) либо в вакууме, но тогда намагниченность будет равна 0.

В реальных условиях практически невозможно точно измерить даже индукцию в точке, так как любой из описанных ниже преобразователей имеет пространственные размеры и, следовательно, всегда будет измерять, как правило неоднородный, магнитный поток, про-

ходящий через площадь, охватываемую измерительным преобразователем. Магнитный поток Φ характеризует плотность силовых линий проходящих через определенную площадь S :

$$\Phi = \int_S B \cdot dS,$$

а при измерениях принимают, что результат соответствует точке геометрического центра преобразователя и усредняют значение потока на площадь:

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (4.5)$$

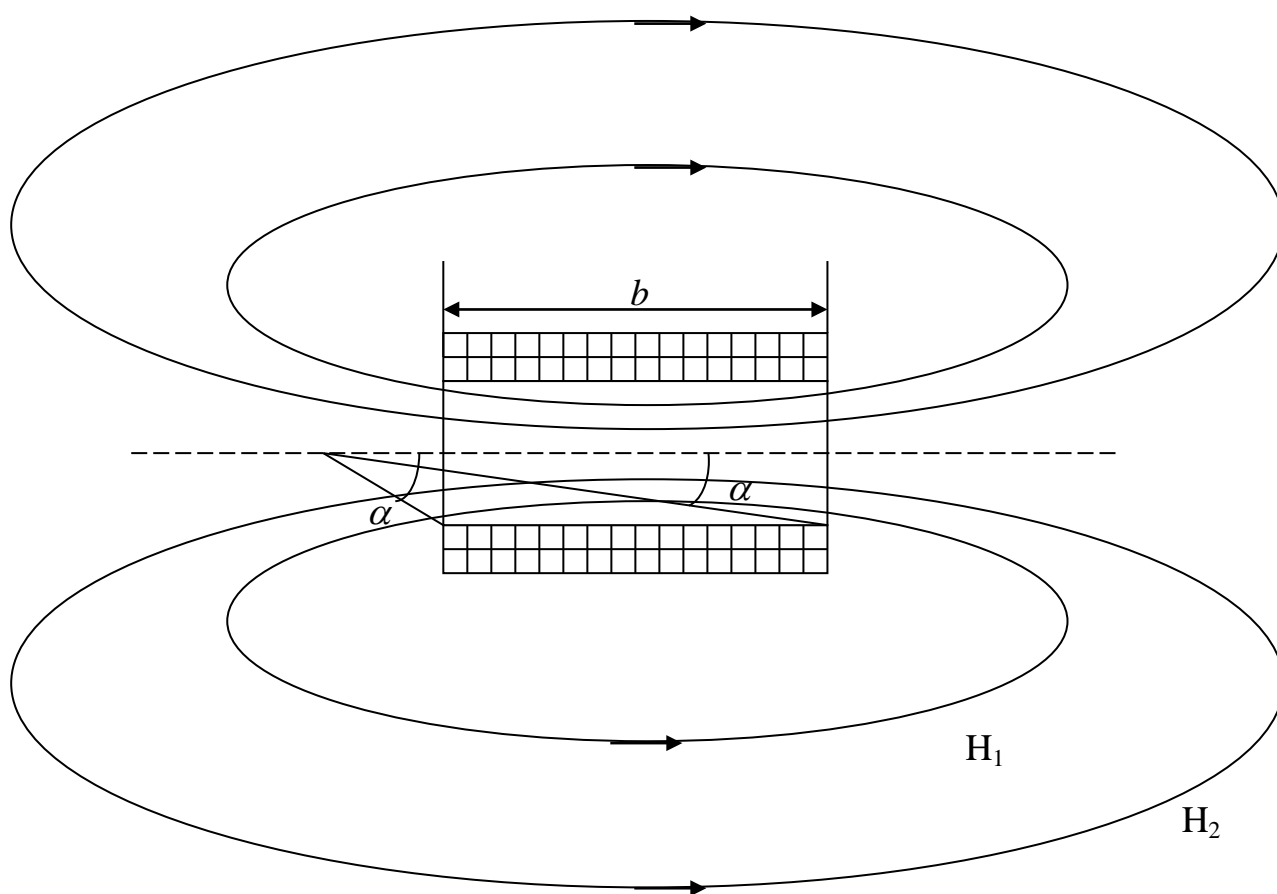


Рисунок 4.1 – Магнитное поле создаваемое катушкой, где $H_1 > H_2$

Следует знать, что напряжённость в реальных условиях измерить невозможно, в некотором смысле – это виртуальная величина, но с ней удобнее работать. Оценить в точке пространства или материала можно только величину магнитной индукции, так как мы можем проводить измерение либо в какой-то среде (воздух, вода, металл) либо в вакууме, но тогда намагниченность будет равна 0.

В реальных условиях практически невозможно точно измерить даже индукцию в точке, так как любой из описанных ниже преобразователей имеет пространственные размеры и, следовательно, всегда будет измерять, как правило неоднородный, магнитный поток, про-

ходящий через площадь, охватываемую измерительным преобразователем. Магнитный поток Φ характеризует плотность силовых линий проходящих через определенную площадь S :

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S},$$

а при измерениях принимают, что результат соответствует точке геометрического центра преобразователя и усредняют значение потока на площадь:

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (4.6)$$

Для измерения магнитных потока, индукции используют различные типы преобразователей: датчики Холла, магниторезисторы (в которых изменяется активная составляющая электрического сопротивления под действием магнитного поля), катушки индуктивности и. т. д, чувствительность которых определяется как:

$$S = \frac{\Delta X}{X} \cdot \frac{\Delta B}{B},$$

где X – физическая величина, реагирующая на изменение магнитного поля с индукцией B . Для датчиков Холла такой физической величиной является разность потенциалов двух поверхностей датчика, для магниторезистора – сопротивление, для катушки индуктивности – ток.

Эффект Холла (открыт в 1879 г.) – это возникновение в металле (или полупроводнике) с током плотностью I , помещённом в магнитное поле B , электрического поля (разности потенциалов) в направлении, перпендикулярном B и I в соответствии как показано на рисунке 2.

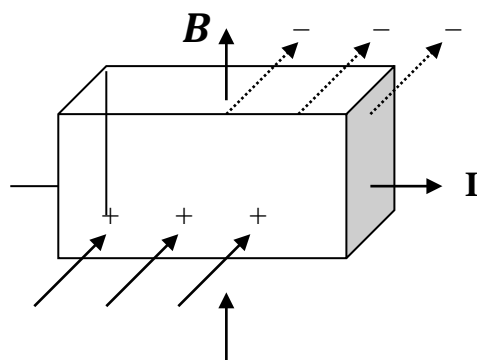


Рисунок 4.2 – Возникновение эффекта Холла в материале под воздействием внешнего магнитного поля.

Если поместим металлическую пластинку с током плотностью I в магнитное поле B , перпендикулярное I . При данном направлении I скорость носителей тока в металле – электронов – направлена справа налево. Электроны испытывают действие силы Лоренца, которая в данном случае направлена по направлению стрелок. Таким образом, у заднего края

пластинки возникнет повышенная концентрация электронов (он зарядится отрицательно), а у переднего – их недостаток (зарядится положительно). В результате этого между краями пластинки возникнет дополнительное поперечное электрическое поле. Когда напряженность E_e этого поперечного поля достигнет такой величины, что его действие на заряды будет уравновешивать силу Лоренца, то установится стационарное распределение зарядов в поперечном направлении. Тогда:

$$eE_e = e\Delta\varphi/a = e\nu B, \text{ или } \Delta\varphi = \nu Ba \quad (4.7)$$

где a – ширина пластинки, $\Delta\varphi$ – поперечная (Холловская) разность потенциалов.

Учитывая, что сила тока $I = iS = ne\nu S$, где S – площадь поперечного сечения пластинки толщиной d , n – концентрация электронов, ν – средняя скорость упорядоченного движения электронов. Получим:

$$\Delta\varphi = (Id/(nea))Ba = (1/en)(IBd) = R(IBd). \quad (4.8)$$

Получается, что датчик Холла всегда измеряет значение индукции магнитного поля перпендикулярного его пластине.

Что характерно, неважно в каком направлении будем пропускать ток, а в каком измерять относительно плоскости перпендикулярной направлению магнитного поля. Таким образом, Холловская поперечная разность потенциалов прямо пропорциональна магнитной индукции B , силе тока I и толщине пластинки d . В формуле (4.7) $R = 1/(en)$ – постоянная Холла, зависящая от вещества. По измеренному значению постоянной Холла можно:

- определить концентрацию носителей тока в проводнике (при известных характере проводимости полупроводников и заряде носителей);
- судить о природе проводимости полупроводников, так как знак постоянной Холла совпадает со знаком заряда носителей тока.

Эффект Холла по этому наиболее эффективный метод изучения энергетического спектра носителей тока в металлах и полупроводниках. Он применяется также для умножения постоянных токов в аналоговых вычислительных машинах, в измерительной технике в виде датчиков Холла.

Главной особенностью датчиков Холла является возникновение полезного напряжения в поперечном по отношению к сигналу направлении, в одной плоскости. Это определило наиболее распространённую форму датчика Холла – плоскую прямоугольную пластинку с парами проводов. Одна из них служит для создания тока через датчик, другая для съёма полученного напряжения или тока в поперечном направлении.

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Исследование характеристик датчика Холла

1.1 Рассчитайте значение магнитной индукции на оси встроенной в установку катушки (при напряжении питания катушки 10 В), используя формулы 4.3 и 4.4 Постройте график зависимости магнитной индукции поля на оси при удалении от центра возбуждающей катушки на расстояние до 100 мм.

1.3 Определите зависимость изменения индукции магнитного поля в центре катушки, при изменении напряжения подаваемого на катушку, используя формулы 4.3, 4.4 и закон Ома для участка цепи переменного тока.

1.4 Подсоедините клеммы катушки возбуждающей магнитное поле к источнику питания постоянного тока и установите минимальное напряжение питания 10 В. Клеммы питания датчика Холла подсоединить к другому источнику питания и установить минимальное напряжение 0,5 В, а измерительные клеммы к осциллографу.

1.5 Установить датчик Холла (индуктивный преобразователь) у торца возбуждающей катушки и измерять значение возникающего напряжения, изменяя напряжение на клеммах питания через 0,5 В до 4 В. Рассчитайте значение магнитной индукции в точке измерения и определите усреднённое значение постоянной Холла по формуле:

$$R = U_{изм} / (BaI). \quad (4.9)$$

1.6 Постройте графическую зависимость напряжения на выходе измерительного канала относительно изменения напряжения в канале питания.

1.7 Затем, оставив напряжение питания датчика равным 4 В и изменяя напряжение питания катушки возбуждения поля от 0 до 15 В через 3 В определите значения напряжений, возникающих на обкладках датчика Холла. Рассчитайте значение магнитной индукции в точке измерения и определите усреднённое значение постоянной Холла по формуле 7. Постройте графическую зависимость напряжения на выходе измерительного канала относительно изменения магнитной индукции поля.

1.8 Зная постоянную Холла, напряжение питания катушки и датчика Холла определите экспериментально изменения поля при удалении датчика по оси катушки через 1 см от торца, результаты отобразите на графике построенном по п. 1.

1.9 Определите чувствительность датчика Холла по формуле:

$$S_x = \frac{\Delta U}{\Delta B}. \quad (8)$$

1.10 По полученным результатам сделайте выводы, сравните два значения постоянной Холла, полученных при двух разных опытах.

2. Исследование характеристик индуктивного преобразователя

2.1 Вырежьте лист бумаги по форме плоскости, в которой находится катушка возбуждения и уложите её в лабораторную установку.

2.2 Подключите катушку, возбуждающую магнитное поле, к генератору переменного тока, установите на генераторе значение равное 20 В. Подключите измерительную катушку к осциллографу.

2.3 Проведите замеры измерительной катушкой возникающей э.д.с. индукции в магнитном поле в точках по рисунку 3, находящихся друг от друга на расстоянии 10 мм. Поворачивая катушку таким образом, чтобы её ось совпадала с осью катушки, а вторым измерением, чтобы была перпендикулярна ей.

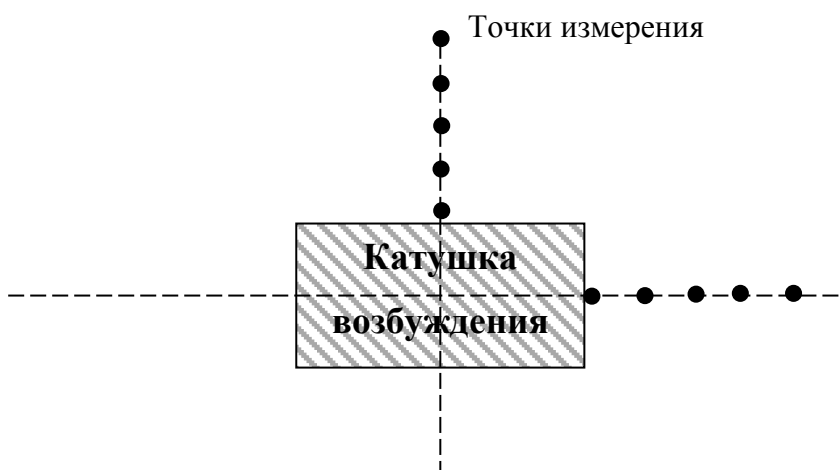


Рисунок 3 – Точки измерений э.д.с. индукции в первом опыте

2.4 Рассчитайте для заданных точек значение вектора магнитной индукции исходя из того, что магнитная индукция является векторной суммой нормальной и тангенциальной составляющих.

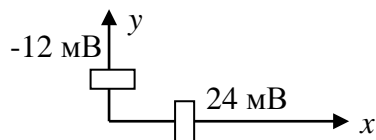
2.5 Изобразите графически вектора магнитной индукции в точках измерения в выбранном масштабе.

2.6 Постройте графики изменения нормальной, тангенциальной составляющих и вектора напряжённости магнитного поля в зависимости от расстояния точки измерения от катушки возбуждающей магнитное поле.

III КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём заключается эффект Холла?
2. Что такое и как можно вычислить R , определите число активных носителей зарядов в материале использованного вами датчика?
3. Что изменится, если в катушку возбуждения магнитного поля или на клеммы питания датчика Холла подать переменный ток, а если переменный ток подать одновременно?
4. Определите величину магнитного потока (по результатам эксперимента) в точке прилегающей к торцу катушки при напряжении питания катушки 10 В и напряжении питания датчика Холла 4 В.
5. Каким образом можно повысить чувствительность данного датчика Холла при измерениях магнитных полей?
6. Каким явлением объясняется большая разница полученных значений магнитной индукции получилась при измерениях в первом опыте?
7. Что будет показывать осциллограф при внесении измерительной катушки в постоянное магнитное поле?
8. Почему резко возросла э.д.с. катушки при внесении ферромагнитного стержня в центр измерительной катушки?
9. Используя формулу 9, объясните, почему напряжение, наводимое в катушке индуктивности, отстаёт по фазе от силы тока.
10. От каких параметров зависит чувствительность измерительной катушки.
11. Как зависит эффект Холла от направления магнитного поля?
12. В каких единицах измеряется абсолютная и относительная магнитная проницаемость?
13. Дайте описания физического эффект Холла?
14. Как определяется и от каких параметров преобразователя зависит постоянная Холла? Вычислите постоянную Холла преобразователя, если в магнитном поле 200 А/м, в пластине толщиной 0,1 мм с током 0,5 А возникает ЭДС 25 мВ.
15. От каких параметров зависит чувствительность измерительной катушки? Возможно ли измерение постоянного магнитного поля катушкой?
16. Определите величину переменного магнитного поля с частотой 100 Гц, если в катушке с площадью поперечного сечений 20 мм² и количеством витков 10000 возникает ЭДС 240 мВ?

17. Нарисуйте на графике, что покажет осциллограф при внесении измерительной катушки с чувствительностью $20 \text{ В}\cdot\text{м}/\text{А}$ в переменном магнитном поле напряженностью $80 \text{ А}/\text{м}$ и частотой 26 Гц ?
18. Решите задачу 3.2.5, если угол между магнитным полем и осью катушки составляет 30° ?
19. Дайте понятие ферромагнетизма? Во сколько раз изменится сигнал в задаче 3.2.4, если в катушке находится ферромагнитный стержень с относительной магнитной проницаемостью 100 ?
20. Помещенный в магнитное поле датчик Холла выдает при различной ориентации следующее напряжение:



Рассчитайте угол магнитного поля с осью Ox и покажите его на рисунке?

21. Чувствительность датчика Холла $120 \text{ мВ}\cdot\text{мм}/\text{А}$, чувствительность измерительной катушки $200 \text{ В}\cdot\text{м}/(\text{Гц}\cdot\text{А})$. Сигнал на датчике Холла составляет 210 мВ . Рассчитайте сигнал на измерительной катушке в магнитном поле с периодом 4 с , если сигнал на датчике Холла равен 130 мВ .
22. Определите величину переменного магнитного поля с частотой 80 Гц , если в катушке с площадью поперечного сечений 12 мм^2 и количеством витков 4000 возникает ЭДС 14 мВ ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Цель работы: Исследовать характеристики первичных преобразователей акустических величин

Решаемые задачи:

- 1) Определить коэффициент двойного преобразования пьезоэлектрического преобразователя.
- 2) Определить импульсную характеристику преобразователя.
- 3) Определить амплитудно-частотную характеристику пьезоэлектрического преобразователя.
- 4) Определить скорость распространения акустических волн в стальной пластине.

Приборы, материалы и вспомогательные средства: пьезоэлектрический преобразователь, генератор, осциллограф.

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Измерительная и регистрирующая аппаратура в подавляющем большинстве случаев работает только с электрическими сигналами, поэтому для приема и излучения акустических волн используют преобразователи (П), трансформирующие акустические колебания в колебания электрического напряжения и обратно. Преобразователи различаются по физическому принципу работы:

- пьезоэлектрические;
- электромагнитные акустические;
- емкостные;
- магнитострикционные;
- оптические.

Наибольшее распространение в неразрушающем контроле получили пьезоэлектрические преобразователи (ПП), изготовленные из специального материала – пьезоэлектриков, которые обладают высокой чувствительностью к деформациям и акустическим колебаниям. Работа этих преобразователей основана на явлении пьезоэлектрического эффекта.

При деформации некоторых диэлектриков происходит несимметричное смещение электрических зарядов и, в результате, на границах материала возникают uncompensated поверхностные заряды. В материале появляется электрическое поле, а на его границах электрическое напряжение (рисунок 5.1). Это явление называют пьезоэлектрическим эффектом или сокращенно пьезоэффектом.

Формально пьезоэффект может быть представлен следующим образом: под действием механической силы или деформации на границах материала возникает электрическое напряжение:

$$F, \Delta \Rightarrow U,$$

где F – механическая сила растяжения или сжатия; Δ – деформация.

Поэтому очевидно, что пьезоэффект используется для трансформации акустических колебаний в электрический сигнал, то есть для приема акустических волн

В пьезоэлектрических материалах существует и обратное явление, т. е. – обратный пьезоэлектрический эффект, в результате чего возникают механические силы деформирующие такой материал под действием внешнего электрического поля:

$$U \Rightarrow F, \Delta.$$

Этот эффект применяется для возбуждения акустических волн. На границы пластины из пьезоэлектрического материала подают переменное электрическое напряжение. При этом возникают акустические колебания пластины.

Пьезопластина является одним из наиболее ответственных элементов АЭ приемного канала диагностической системы. Технические характеристики преобразователя оказывают существенное влияние на измеряемые параметры АЭ сигнала, используемые для оценки степени опасности дефектов. Поэтому конструкция ПП (рисунок 5.2) и технические характеристики его элементов определяют достоверность результатов контроля.

Основным элементом конструкции является пьезоэлектрическая **пластина**, осуществляющая трансформацию акустических колебаний в электрический сигнал. На верхнюю и нижнюю горизонтальные поверхности пьезоэлектрической пластины нанесен слой металла, к которому припаяны **электрические выводы**. По этим проводникам электрический сигнал с пьезопластины поступает на **разъем** и далее по экранированному **кабелю** в измерительную аппаратуру.

Корпус обеспечивает общую прочность конструкции преобразователя, защищает ее от внешних механических воздействий, агрессивных сред и электромагнитных помех. Для предотвращения повреждения пьезопластины со стороны объекта контроля расположен про-

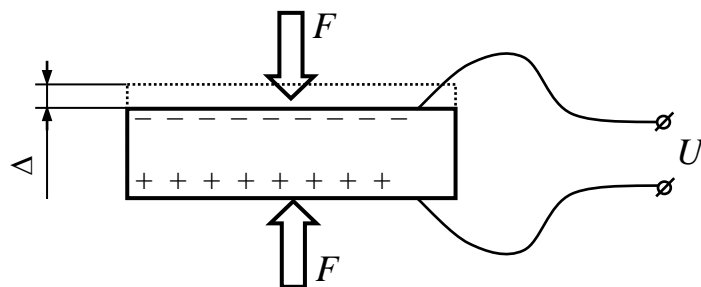


Рисунок 5.1 – Иллюстрация пьезоэлектрического эффекта: возникновение электрического напряжения U под действием механической силы F , деформации материала Δ

тектор (protect (англ.) - защищать). В основном, этот элемент изготавливают из электроизолирующего прочного материала, устойчивого к истиранию (керамика, органические и не органические смолы с наполнителями). Электрическая изоляция пьезопластины от объекта контроля является наиболее ответственным моментом в конструкции преобразователя, так как в массивных металлических конструкциях всегда присутствуют поверхностные микроскопические токи («блуждающие» токи), способные привести к появлению электромагнитных помех.

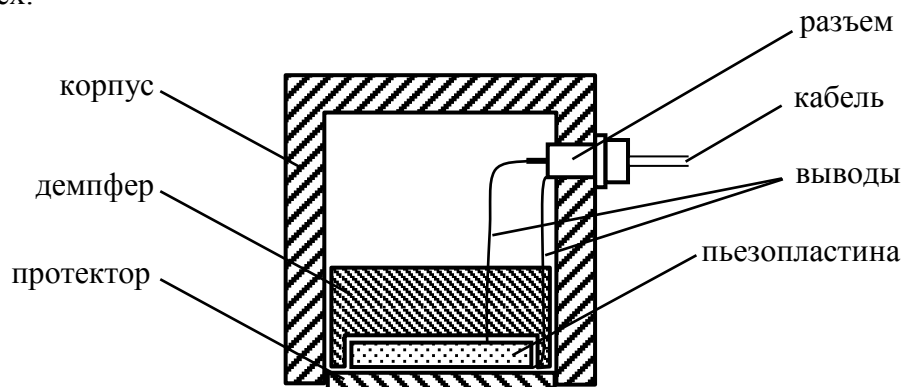


Рисунок 5.2 – Конструкция пьезоэлектрического преобразователя

Например, в случае диэлектрического протектора использование электропроводящей контактной смазки приводит к появлению контакта между ПП и объектом контроля и, в конечном счете, возникновению импульсных помех в АЭ канале.

Демпфер в преобразователе применяют с целью уменьшения длительности свободных колебаний пьезопластины и расширения рабочей полосы частот. В отсутствие демпфера пьезопластина работает как колокол (рисунок 5.3 а). При этом чувствительный элемент продолжает колебаться даже после прекращения внешнего воздействия. При сильном демпфировании (рисунок 5.3 в) свободные колебания практически отсутствуют, но при этом значительно уменьшается амплитуда регистрируемого импульса.

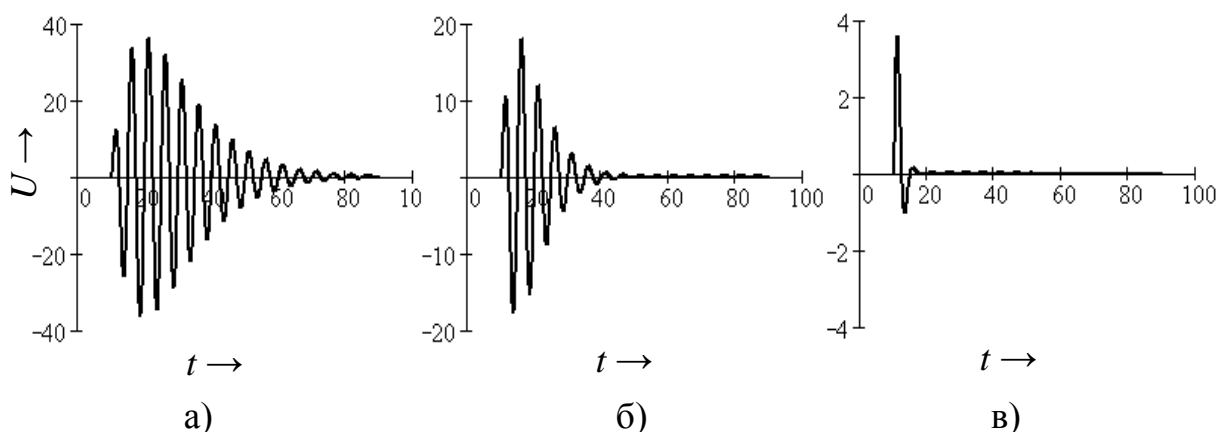


Рисунок 5.3 – Электрический сигнал с преобразователя: а – без демпфирования, б – слабое демпфирование, в – сильное демпфирование

Основным достоинством демпфированных преобразователей является подобие формы и частотных характеристик электрического импульса первоначальному механическому воздействию, равномерная чувствительность к акустическим сигналам в широком диапазоне частот. К преимуществам резонансных преобразователей (без демпфирования) относят высокую чувствительность и помехозащищенность, связанную с регистрацией только узкого частотного диапазона вблизи резонансной частоты. Для контроля определенного вида объекта выбирают преобразователи такие, чтобы обеспечить максимальную достоверность результатов контроля.

Чувствительность ПП характеризуется коэффициентом преобразования в режиме приема, который определяется отношением амплитуды электрического напряжения к амплитуде акустической волны, поступающей на преобразователь:

$$K_i = \frac{U_{\max}}{\Delta x_{\max}},$$

где K_i – коэффициент прямого преобразования, В/м; U_{\max} – амплитуда электрического сигнала, снимаемого с преобразователя, В; Δx_{\max} – амплитуда акустической волны, поступающей на преобразователь, м.

Чем выше чувствительность преобразователя, тем больше возникает электрический сигнал. Для определения коэффициента чувствительности посылают акустическую волну с известной амплитудой и частотой на вход ПП и регистрируют амплитуду электрического сигнала с преобразователя (рисунок 5.4).

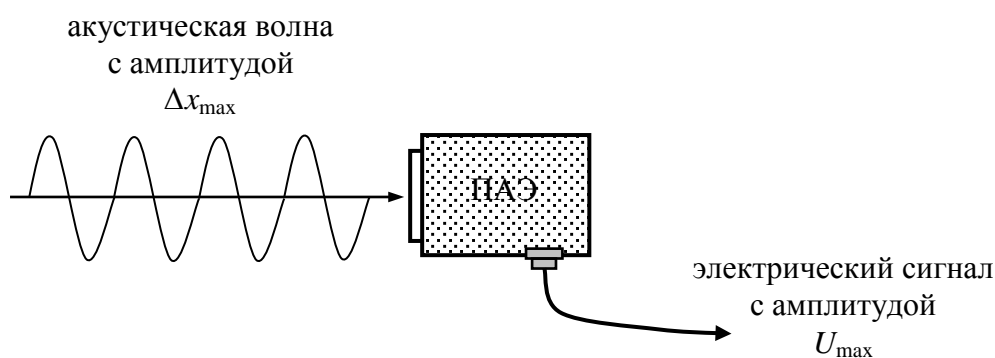


Рисунок 5.4 – Общая схема измерения коэффициента приема преобразователя

Аналогичным образом определяется коэффициент преобразования в режиме излучения. На преобразователь подаются электрические колебания с амплитудой U_{\max} . При этом возникает акустическая волна. Измеряя амплитуду волны Δx_{\max} , определяют коэффициент излучения по следующей формуле:

$$K_{\dot{E}} = \frac{\Delta x_{\max}}{U_{mzx}},$$

где $K_{\dot{E}}$ – коэффициент обратного прямого преобразования, м/В; U_{mzx} – амплитуда электрического сигнала, подаваемого на преобразователь, В; Δx_{\max} – амплитуда акустической волны, выходящей с преобразователя, м.

Измерение чувствительности излучения и приема требует сложной аппаратуры для измерения амплитуды акустических колебаний и определенных условий, которые могут быть достигнуты только в лабораториях. На практике для характеристики чувствительности ПП используют коэффициент двойного преобразования, определяемый как отношение амплитуды электрического сигнала снимаемого с ПП к амплитуде электрического сигнала подаваемого на ПП:

$$K_{UU} = \frac{U_i}{U_e},$$

где K_{UU} – коэффициент двойного преобразования, относительные единицы; U_u – амплитуда электрического сигнала, подаваемого на преобразователь, В; U_n – амплитуда электрического сигнала, снимаемого с преобразователя, В.

Для измерения коэффициента двойного преобразования могут применяться различные схемы (рисунок 5.5). В первой схеме использованы два идентичных преобразователя, один из которых работает в режиме излучения, второй в режиме приема акустических сигналов (рисунок 5.5, а).

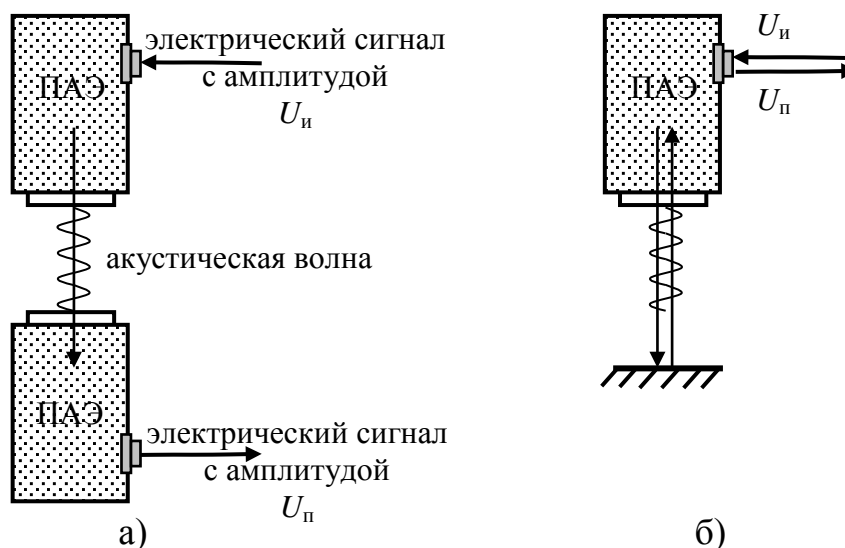


Рисунок 5.5 – Общая схема измерения коэффициента двойного преобразования: а – с двумя ПАЭ, б – с одним ПАЭ

На рисунке 5.5, б K_{UU} определяется по сигналу, отраженному от границы и вернувшись на преобразователь. При этом в обоих случаях волна дважды трансформируется (из электрического сигнала в акустическую волну и обратно).

В идеальном пьезоэлектрическом материале, в котором отсутствуют потери и рассеяние энергии, коэффициент K_{UU} должен равняться единице. Однако в практической деятельности всегда выполняется условие:

$$K_{UU} = K_E \cdot K_I \ll 1.$$

Чувствительность преобразователя к акустическим сигналам зависит от частоты волны. Рассмотрим систему из двух преобразователей источник-приемник для измерения коэффициента двойного преобразования (рисунок 5.6).

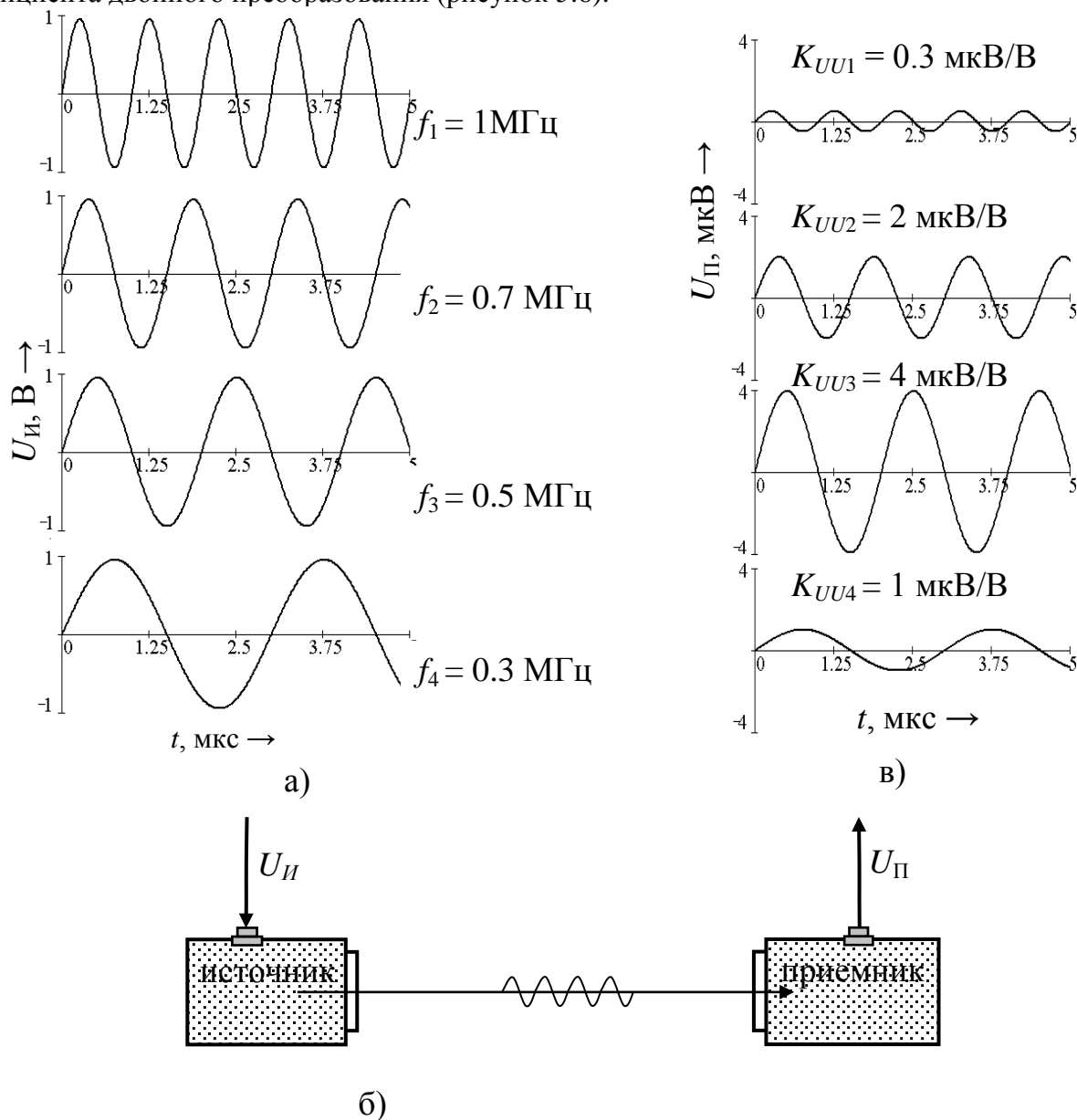


Рисунок 5.6 – Схема измерения коэффициента двойного преобразования сигнала на различных частотах: а – электрический сигнал на источнике, б – система преобразователей источник-приемник, в – электрический сигнал на приемнике.

На преобразователь-источник подаются электрические сигналы с различными частотами, но одинаковыми амплитудами (рисунок 5.6, а). В результате двойного преобразования

на преобразователе-приемнике регистрируют электрические сигналы (рисунок 5.6, в). Амплитуда принимаемых сигналов различна, что связано с зависимостью чувствительности преобразователя от частоты воздействующего сигнала.

Нанесем на графике квадратами (рисунок 5.7) значения коэффициента двойного преобразования, указанные на рисунке 5.6. Проведя дополнительные измерения, получим более точную зависимость в виде сплошной линии, соединяющей первоначальные точки. Эта зависимость называется **амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)** преобразователя. АЧХ позволяет определить чувствительность ПП для сигналов с разными частотами.

Большинство ПП имеют АЧХ с характерной формой, подобной колоколу. Особое значение при этом имеет максимальное значение коэффициента преобразования – K_{\max} на соответствующей частоте – f_{\max} .

Эти параметры описывают наиболее эффективную частоту и чувствительность ПП. Однако, с практической точки зрения необходимо знать диапазон частот, в котором преобразователь еще допустимо использовать. Полосу пропускания определяют из условия: коэффициент преобразование не меньше половины максимального. На рисунке 5.7 полоса пропускания преобразователя – (f_1, f_2) . Таким образом, если у преобразователя полоса пропускания от 0.5 до 0.9 МГц, то в этом диапазоне его чувствительность не более чем в два раза меньше максимальной чувствительности (на 6 дБ).

Разницу максимальной и минимальной рабочей частоты называют шириной полосы пропускания: $\Delta f = f_2 - f_1$. В зависимости от соотношения ширины полосы пропускания и частоты с максимальным коэффициентом преобразования ПП классифицируют на виды: резонансные, полосовые и широкополосные.

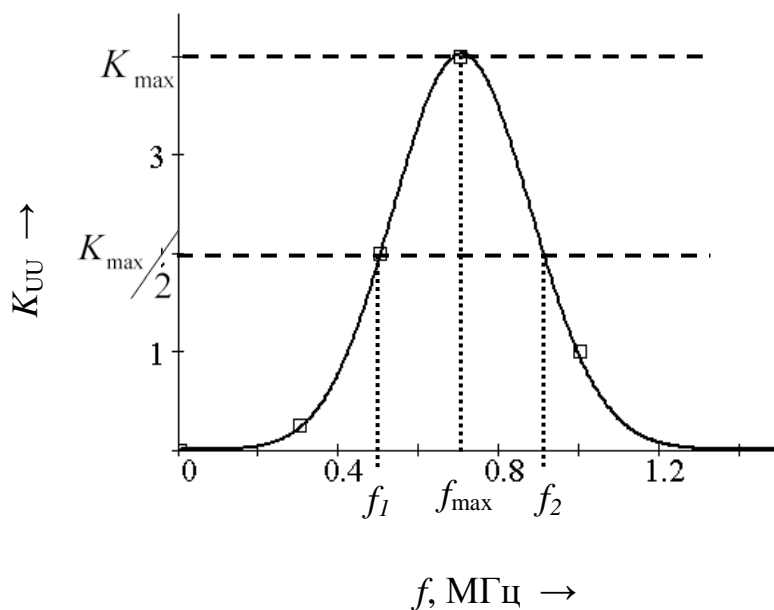


Рисунок 5.7 – Зависимость коэффициента двойного преобразования от частоты

Резонансные ПП обладают самым узким частотным диапазоном, для которого выполняется условие:

$$\frac{\Delta f}{f_{\max}} < 0.2.$$

Частоту с максимальной чувствительностью называют резонансной частотой – f_p .

Конструкция резонансных ПП является одной из самых простых. В ней отсутствует демпфирующий элемент и используется пьезоэлектрическая пластина с параллельными гранями (рисунок 5.8). Чувствительный элемент такой

формы обладает собственной частотой, т. е. частота, которой совершаются свободные колебания пластины сле прекращения внешнего воздействия. В данной ситуации допустимо будет провести аналогию с гитар-струной. После удара по струнам (воздействие пре-кратилось) струна продолжает совершать колебания

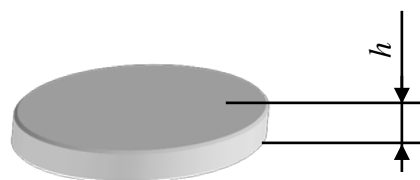


Рисунок 5.8 – Пьезопластина резонансного ПАЭ

на по-си-ной все-

гда с одной и той же частотой. Подобная ситуация наблюдается и в резонансном преобразо-вателе. После прохождения волны пьезопластина некоторое время колеблется, пока не за-тухнут свободные колебания. Собственная частота связана с толщиной пластины h и скоро-стью продольных волн в пьезоэлектрическом материале C_l следующим образом:

$$f_{\text{ма}} = \frac{C_l}{2 \cdot h},$$

Таким образом, резонансный ПП характеризуется двумя частотами: резонансной f_p и собственной $f_{\text{соб}}$. Для понимания связи этих двух частот рассмотрим еще одну аналогию с качелями, у которых так же имеются собственная и резонансные частоты. При этом очевид-ным является следующий факт: максимальная амплитуда колебаний наблюдается в том слу-чае, когда частота внешнего воздействия совпадает с собственной частотой свободных коле-баний. Подобная закономерность наблюдается и для пьезопластины, с допустимой в дефек-тоскопии погрешностью резонансная частота равна собственной частоте:

$$f_{\delta} \approx f_{\text{ма}} = \frac{C_l}{2 \cdot h},$$

Основными достоинствами резонансных преобразователей являются:

- максимально возможная чувствительность
- высокая помехозащищенность, которая обусловлена селективностью преобразовате-ля по частоте акустического сигнала.

Так, если заведомо известно, что шумы рабочего двигателя находятся в области от 50 до 1000 Гц, то использование резонансного ПП с частотой 10 кГц позволяет полностью от-строиться от этих шумов, так как полоса пропускания ПП в соответствии с формулой (5.8) приходится на область частот от 8 до 12 кГц. При этом чувствительность преобразователя в

частотной области с шумами в сотни и тысячи раз меньше, чем в рабочей области (рисунок 5.9).

Резонансный преобразователь имеет существенное ограничение в применении, связанное с сильным искажением первоначального акустического сигнала. Так как в конструкции ПП отсутствует демпфер, который мог бы уменьшить длительность свободных колебаний, то сигнал с преобразователя имеет сильно затянутые передний и задний фронты импульса.

Это ограничение отсутствует у полосовых и широкополосных преобразователей, которые имеют протяженную область рабочих частот (рисунок 5.10). Их классификация проводится на основании следующих условий:

- для полосового преобразователя верхняя рабочая частота более чем в два раза превышает нижнюю частоту:

$$\frac{f_2}{f_1} > 2,$$

- для широкополосного преобразователя верхняя частота более чем в 5 раз превышает нижнюю частоту:

$$\frac{f_2}{f_1} > 5,$$

В конструкции ПП этого типа абсолютно необходимым элементом является демпфер, который выравнивает коэффициент преобразования по частоте, снижая при этом абсолютную чувствительность. Пьезопластины для широкополосных преобразователей изготавливают специальной формы переменной толщины от h_1 до h_2 (рисунок 5.11), чтобы обеспечить наличие резонансов не на одной частоте, а в некотором интервале частот.

В практических приложениях широкая полоса пропускания преобразователя является существенным достоинством, когда источники АЭ излучают волны на неизвестных или значительно различающихся частотах. В этих случаях более актуальным является не значение абсолютной чувствительности, а равномерность чувствительности преобразователя по частоте.

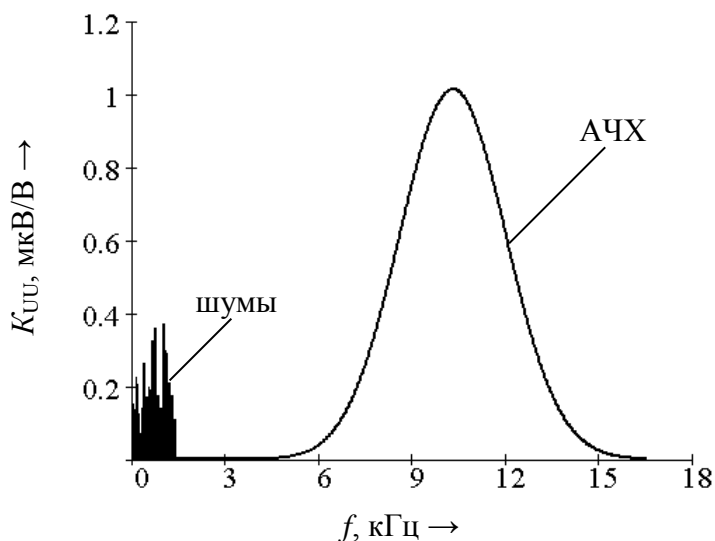


Рисунок 5.9 – АЧХ резонансного ПАЭ и низкочастотные шумы двигателя

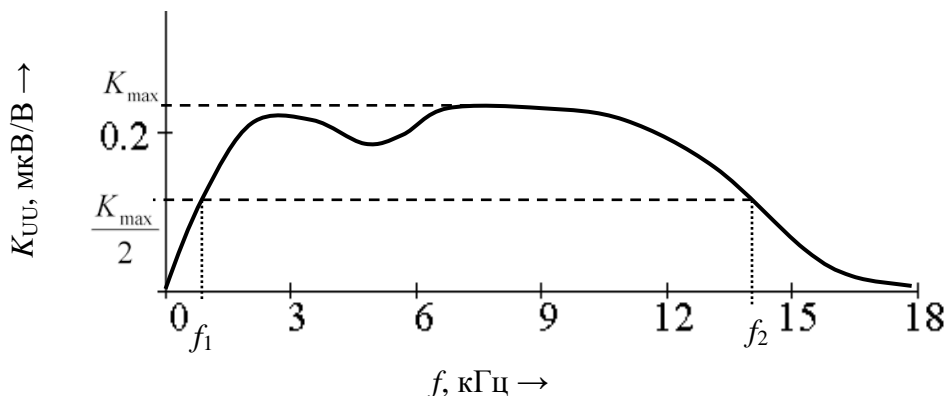


Рисунок 5.10 – АЧХ широкополосного преобразователя, построенная по коэффициенту двойного преобразования

Широкая полоса пропускания обуславливает достоверное преобразование акустического импульса в электрический сигнал с сохранением его первоначальной формы. Демпфирующий элемент в конструкции ПП препятствует возникновению собственных колебаний пьезопластины. Этот факт обуславливает необходимость применения широкополосных преобразователей в приложениях, в которых для оценки дефектности используются информативные параметры, характеризующие форму импульса.

Электрические сигналы с преобразователя поступают в АЭ систему, где они измеряются, сохраняются и, наконец, обрабатываются. Процесс распространения по объекту контроля и взаимодействие с преобразователем оказывает существенное влияние на окончательную форму АЭ сигнала. Центральной задачей является разработка способов выделения информации об источнике АЭ на основе анализа параметров регистрируемых импульсов.

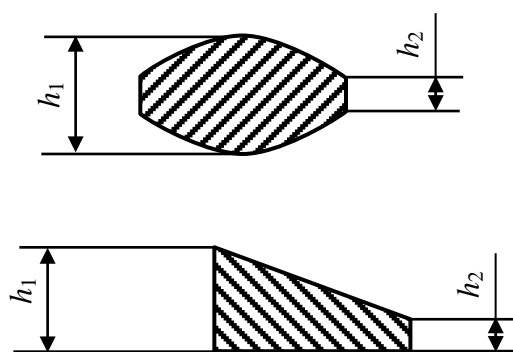
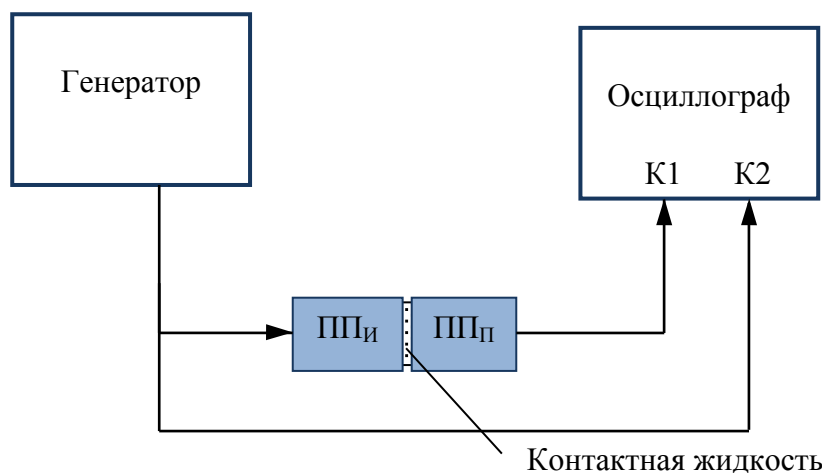


Рисунок 5.11 – Форма пластин переменной толщины от h_1 до h_2 для полосовых и широкополосных преобразователей

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Измерение коэффициента двойного преобразования

1.1 Соберите схему представленную на рисунке.



1.2 Подайте с генератора на ПП-источник синусоидальный сигнал с максимальной амплитудой и частотой, соответствующей частоте f_0 , указанной на преобразователе.

1.3 На первый канал осциллографа подайте сигнал с ПП-приемника, а на второй канал сигнал с генератора.

1.4 На осциллографе добейтесь устойчивых синусоидальных сигналов.

1.5 Определите амплитуду и частоту сигналов, рассчитайте коэффициент двойного преобразования.

2. Определить амплитудно-частотную характеристику пьезоэлектрического преобразователя.

2.1 Установите на источнике частоту $0,1 \cdot f_0$ и определите коэффициент двойного преобразования.

2.2 Изменяйте частоту на источнике с шагом $0,1 \cdot f_0$ до $3 \cdot f_0$ и одновременно фиксируйте коэффициент двойного преобразования.

2.3 Постройте график амплитудно-частотной характеристики.

3. Определить импульсную характеристику преобразователя

3.1 Подайте на источник прямоугольный сигнал длительностью $20/f_0$.

3.2 Зафиксируйте в отчете сигнал на ПП-приемнике, объясните форму сигнала.

III КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление называют пьезоэффектом?
2. Какие единицы физические единицы измерения преобразуются при прямом и обратном пьезоэлектрическом эффекте?
3. Чем характеризуется чувствительность ПП?
4. От чего зависит коэффициент преобразования?
5. Как определяется коэффициент двойного преобразования?
6. Из каких основных элементов состоит пьезоэлектрический преобразователь?
7. Для чего служит протектор преобразователя?
8. Приведите примеры, когда в преобразователе нужно использовать демпфер и наоборот.
9. Что такое АЧХ?
10. Как вы понимаете выражение «полоса пропускания»?
11. Зачем в некоторых преобразователях используется широкая полоса пропускания?
12. Назовите основное достоинство демпфированных преобразователей.
13. Перечислите виды ПП.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИЙ

Цель работы: Выполнить тарировку тензорезисторных датчиков, наклеенных на тарировочную балку

Решаемые задачи:

- 1) Рассчитать деформации балки равного сопротивления (далее - балки) в месте наклейки тензодатчиков при изгибе;
- 2) Измерить прогиб балки с помощью индикатора часового типа для подтверждающего расчета деформаций;
- 3) Измерить выходное напряжение тензометрического моста с последующим расчетом коэффициента тензочувствительности.

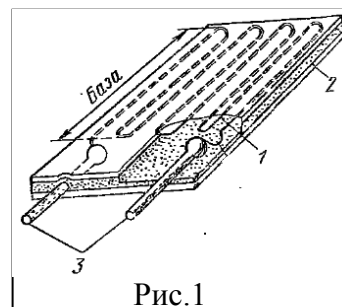
Приборы, материалы и вспомогательные средства:

1. Балочка, закрепленная на опоре.
2. Тензодатчики проволочные (4 шт.) ПКС-7-120
3. Набор гирь
4. Индикатор часового типа ИЧ 0-10
5. Стойка гибкая МС-29
6. Источник постоянного напряжения
7. Измерительная система
8. Комплект соединительных проводов

I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В основе метода измерения механических напряжений с помощью тензорезисторного датчика (далее - тензодатчика) положена зависимость омического сопротивления R проводника от его длины l и площади поперечного сечения S , а также от коэффициента, характеризующего электрические свойства материала ρ – удельного сопротивления проводника, на практике имеющий размерность Ом·мм²/м:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$



Существует три типа тензодатчиков: проволочный, пленочный и полупроводниковый. *Проволочный* тензодатчик (см. рис.1) представляет собой проволоку (1) диаметром 0,015-0,05 мм, выполненную из материала с высоким параметром ρ (константан, нихром, хромель),

уложенной петлями и вклеенной между двумя подложками (2) из изоляционной пленки. К

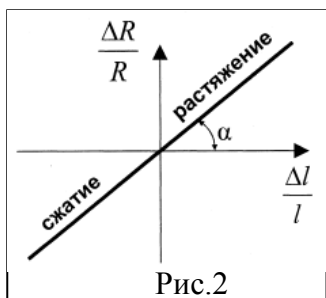


Рис.2

концам проволоки припаяны два вывода (3) для подключения тензодатчика к измерительной цепи. Для измерений механических напряжений тензодатчик должен быть прочно приклеен к поверхности исследуемого объекта. Деформации объекта воспринимаются тензодатчиком, тем самым, изменяя длину проволоки, её поперечное сечение и, в конечном счете, изменяя омическое сопротивление R тензодатчика:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + m) \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

где μ - коэффициент Пуассона, характеризующий изменение размеров проволоки при растяжении (для металлов $\mu = 0,2 \dots 0,5$), а m - коэффициент, учитывающий изменение удельного сопротивления. Из формулы видно, что относительное изменение сопротивления тензодатчика $\Delta R/R$ является линейной функцией от деформации $\epsilon = \Delta l/l$ (см. рис.2). Коэффициент пропорциональности $k = 1 + 2\mu + m$ в формуле (1), называемый коэффициентом тензочувствительности, зависит от технологии изготовления тензодатчика, применяемого материала, качества подложки и клея. Данный коэффициент определяется производителем по тарировке, проведенной на партии тензодатчиков.

Для тарировки тензодатчиков может использоваться консольная тарировочная балочка, которая имеет в плане треугольную форму (балочка равного сопротивления) и нагружается винтом в точке пересечения боковых сторон балочки. В этом случае балочка изгибается по цилиндрической поверхности, причем в пределах клиновидной ее части деформации по длине постоянны. Эта часть балочки используется для наклейки тарлируемых датчиков. Величина деформации рассчитывается по прогибу f балочки, измеряемому индикатором на расстоянии s от заделки. Для того чтобы указанный способ тарировки давал необходимую точность нужно выполнить все приспособление и особенно заделку балочки достаточно жесткими. Угол клина α не должен превышать $6-8^\circ$. Чтобы расширить пределы деформаций, при которых тарироваются датчики, и избежать пластических деформаций балочки, она должна быть изготовлена из стали с высоким пределом текучести и термообработана. После термообработки плоскости балочки шлифуются.

Для того чтобы получить наибольшее изменение сопротивления тензодатчика, его необходимо расположить в направлении действия деформирующего усилия (сжатия или растяжения), т. е. направление измерительной базы должно совпадать с осью, по которой направлено усилие. Если же направления базы и усилия взаимно перпендикулярны, то де-

формация и изменение сопротивления очень малы. Если расположить несколько датчиков под углом друг к другу, то можно определить не только величину деформации, но и направление приложенных к детали усилий.

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{пит}}}{4} k \varepsilon_1$$

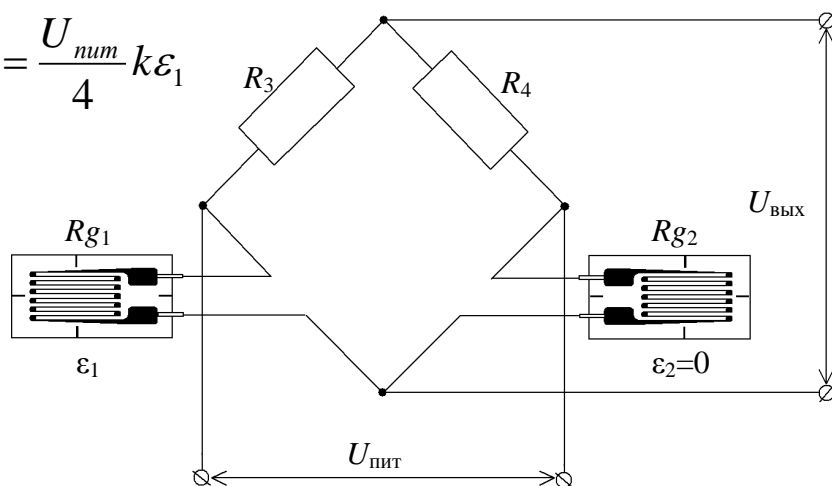


Рис.3

Следует иметь в виду, что деформация является не единственной причиной изменения сопротивления тензодатчика. Сопротивление изменяется и в зависимости от температуры. Компенсация температурной погрешности измерения выполняется путем введения в измерительную мостовую схему тензодатчика – «свидетеля» (R_{g2} на рис.3). Наклеенный на ту же конструкцию, что и рабочий тензодатчик (R_{g1} на рис.3), тензодатчик – «свидетель» не должен испытывать деформаций ($\varepsilon_2=0$).

Выходное напряжение схемы, показанной на рис. 3 также зависит от соотношения сопротивлений резисторов, входящих в состав моста. Мост считается уравновешенным, когда произведение сопротивлений противоположных плеч равны:

$$R_{g1} \cdot R_4 = R_{g2} \cdot R_3,$$

при этом $U_{\text{вых}} = 0$.

Фольговые тензодатчики изготавливают методом фотохимического травления. Решетка такого датчика выполняется из разных сплавов (медь с никелем, серебро с золотом и др.),

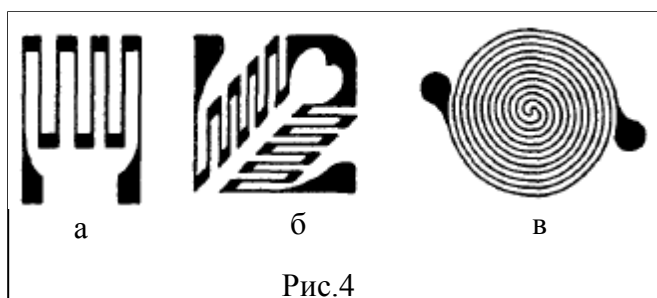


Рис.4

которые обеспечивают достаточную чувствительность и в то же время имеют надежное сцепление (адгезию) с изоляционной основой, на которой выполняется датчик. Фольговые датчики имеют толщину проводящего покрытия 3-15 мкм.

Сопротивление фольговых датчиков находится в пределах от 30 до 300 Ом. На рис.4 показаны различные типы фольговых тензодатчиков: а - предназначен для измерения линейных перемещений; б - розетка из двух датчиков, позволяющая измерять деформации в двух взаимно перпендикулярных направлениях; в - датчик, предназначенный для приклеивания на мембрану и измерения давления.

В отличие от проволочных, фольговые тензодатчики имеют решетку не круглого, а прямоугольного сечения с очень большим отношением ширины к высоте. Благодаря большой площади соприкосновения токопроводящих полосок датчика с деталью обеспечиваются хорошие условия теплоотдачи.

В *полупроводниковых* тензодатчиках используются кристаллические полупроводниковые материалы. Принцип действия их такой же, как и у проволочных тензодатчиков: изменение активного сопротивления из-за механической деформации самого проводника и изменения удельного сопротивления. Но если в металлических *проводниках* главным является изменение размеров (коэффициент μ в уравнении (1)), то в металлических полупроводниках главным является изменение удельного сопротивления (коэффициент ρ в уравнении (1)). Наибольшее распространение получили германиевые и кремниевые тензодатчики, причем последние способны работать при высоких температурах (до 540 °С) и больших механических нагрузках.

II ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1. Рассчитайте для каждого груза величину деформации $\varepsilon_{рас}$, испытываемую балкой при её нагружении:

$$\varepsilon_{рас} = \frac{\sigma}{E_{ст}},$$

Где $E_{ст}$ - модуль упругости стали ($E_{ст} = 210000$ МПа), σ – механическое напряжение, испытываемое балкой, Па:

$$\sigma = \frac{M}{W},$$

где $M = P \cdot l$ – изгибающий момент, Н·м;

l – расстояние от точки приложения нагрузки до контролируемой точки (середины базы тензорезисторов), м;

$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ - момент сопротивления балки прямоугольного сечения, м³;

b – ширина балки в контролируемой точке, м;

h – толщина балки, м.

Результаты расчета занести в таблицу 1

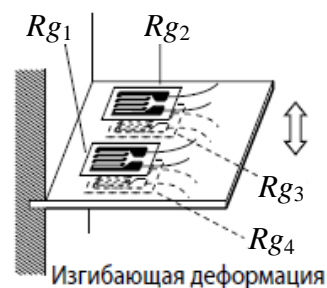
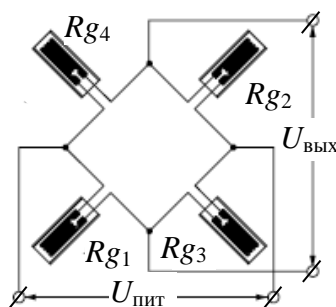
№ изм.	Масса груза m , кг	Общая масса m_{Σ} , кг	Вес P , Н	Изгибающий момент M , Н·м	Момент сопротивления W , м ³	Деформация $\epsilon_{рас}$, отн.ед.
1						
2						
3						
4						
5						
6						

2. Проверьте правильность подключения тензорезисторов к клеммнику, используя мультиметр в режиме «прозвон цепи», а также измерьте мультиметром сопротивления всех тензодатчиков. Запишите измеренные значения. Соберите мостовую измерительную схему, как показано на рисунке:

R_{g1}, R_{g3} – сопротивление активного ТР (ϵ);
 R_{g2}, R_{g4} – сопротивление активного ТР ($-\epsilon$);

Достоинства схемы:

1. Термокомпенсирована,
2. Деформация сжатия / растяжения исключена



Выходное напряжение для данной схемы включения определяется как:

$$U_{вых} = U_{пит} k \epsilon \quad (2)$$

3. Установите на опоре гибкую стойку, закрепите индикатор в середине отрезка, соединяющего базы тензорезисторов R_{g1} и R_{g2} , установите стрелку индикатора в положение «0». Проверьте плавность хода щупа и поворота стрелки индикатора нажатием руки на край балки.

4. Проведите механическое нагружение балочки, поочередно помещая грузы на шпильку. При каждом нагружении измерьте индикатором величину прогиба f балки, а с помощью вольтметра измерьте величину $U_{вых}$.

Результаты занесите в таблицу 2:

№ опыта	Масса груза m , кг	Прогиб f , мм	Деформация $\epsilon_{изм}$, отн.ед.	Напряжение $U_{вых}$, В	Коэффициент тензочувствительности k
1					
2					
3					
4					

5					
6					

Деформация $\epsilon_{\text{изм}}$ рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{\text{изм}} = \frac{fh}{s^2},$$

где s – расстояние от середины базы тензодатчиков до заделки.

Коэффициент тензочувствительности определите из формулы 2.

Сделайте вывод по выполненной работе.

III КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен тензорезисторный датчик и на чем основан принцип измерения деформаций с его помощью?
2. Как измеряется омическое сопротивление с помощью электрического измерительного моста?
3. С какой целью в цепь измерительного моста включается компенсационный датчик?
4. Что такое коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
5. Что такое балка равного сопротивления?
6. Как устроена мостовая схема?
7. 8. Для чего в измерительный мост ставится компенсационный датчик?
8. Как определяются напряжения и деформации электротензометрическим методом?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для ВУЗов – М.: ЮНИТИ, 2001. – 711 с.
- 2) Лифиц И.М. Стандартизация, метрология и сертификация: Учебник для ВУЗов – М.: Юрайт, 2002. – 350 с.
- 3) Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. пособие для ВУЗов – М.: Высш. шк., 2004. – 767 с.
- 4) Сергеев А.Г. Метрология: Учеб. пособие для ВУЗов – М.: Логос, 2002. – 407 с.
- 5) Сергеев А.Г. Метрология, стандартизация, сертификация: Учеб. пособие для ВУЗов – М.: Логос, 2003. – 525 с.

Учебное издание
Физические основы измерений.
Практикум для лабораторных работ по
дисциплине «Физические основы измерений»

Составители: Бехер С.А., Тенитилов Е.С., Бобров А.Л.
Редактор
Технический редактор
Корректор
Компьютерная верстка

Изд. лиц. ЛАР № 021277 от 06.08.98
Подписано в печать
Заказ № _____ Тираж _____ экз. Объем _____ п. л.

Издательство Сибирского государственного университета путей сообщения
630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Тел./факс: (383-2) 287-381. E-mail: press@stu.ru