

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Ильшат Ринатович Мухаметзянов

Должность: директор

Дата подписания: 13.07.2023 14:34:25

Уникальный программный ключ:

aba80b84033c9ef196388e9ea0434f90a83a40954ba270e84bcbe64f02d1d8d0

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ  
И ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

по дисциплине

**Датчики и элементы автоматики**

Индекс по учебному плану: **Б1.В.ДВ.08.01**

Направление подготовки: **12.03.01 Приборостроение**

Квалификация: **Бакалавр**

Профиль подготовки: **Приборостроение**

Вид профессиональной деятельности: **проектно-конструкторский,  
производственно-технологический**

Рекомендовано УМК ЧФ КНИТУ-КАИ

Чистополь  
2023 г.

## **ВВЕДЕНИЕ.**

Данное руководство ставит целью способствовать развитию теоретических и практических навыков экспериментального исследования характеристик различных типов датчиков, умению работать с технической литературой, а также со схемами и контрольно-измерительной аппаратурой.

Предусматривается, что студенты предварительно прослушают соответствующие разделы лекционного курса и ознакомятся с рекомендованной литературой.

Руководство будет способствовать более углубленному изучению студентами материалов, изучающихся в курсе «Датчики и элементы автоматики».

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

Цель работы: Исследование основных параметров и характеристик полупроводниковых терморезисторов (ПТР).

ПТР - это объемные полупроводниковые резисторы с большим отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

Материалом ПТР служат окислы и смеси окислов различных металлов. Так, терморезисторы ММТ и СТ2 изготавливаются из медно-марганцевых, КМТ и СТИ - из кобальто-марганцевых, а СТЗ - из медно-кобальто-марганцевых оксидных полупроводников.

### Основные параметры и характеристики ПТР.

*Температурная характеристика – зависимость* сопротивления ПТР от температуры; в рабочем диапазоне температур эта зависимость определяется соотношением:

$$R_T = A \cdot e^{B/T}, \quad (1.1)$$

где  $R_T$  – сопротивление ПТР при температуре  $T$  К;

$A$  и  $B$  – коэффициенты, постоянные для данного экземпляра ПТР ( $A$  – величина, зависящая от материала и геометрических размеров ПТР;  $B$  – постоянная, характеризующая физические свойства материала, его температурную чувствительность).

Чтобы задать температурную характеристику, достаточно знать координаты двух ее точек ( $R_0, T_0$ ) и ( $R_1, T_1$ ).

Тогда из выражения (1.1), записанного для двух значений температур, имеем:

$$R_T = R_{T_0} e^{B \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.2)$$

Пользуясь формулой (1.2), можно рассчитать величину сопротивления ПТР при любой температуре, если известны значения постоянной  $B$  и сопротивления ПТР при температуре  $T_0$ . Логарифмируя выражение (1.2), получим значение постоянной  $B$ :

$$B = \frac{T_0 T_1}{(T_1 - T_0)} \ln \frac{R_{T_0}}{R_{T_1}} \quad (K) \quad (1.3)$$

*Статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ)* - это зависимость между протекающим через резистор током и падением напряжения на нём при установившемся режиме нагрева (рис.1.1). ВАХ терморезистора не линейна, что обусловлено разогревом рабочего тела протекающим по нему

током. Уравнение ВАХ может быть представлено в параметрическом виде (параметром является  $T$ ), для чего составим уравнение теплового баланса:

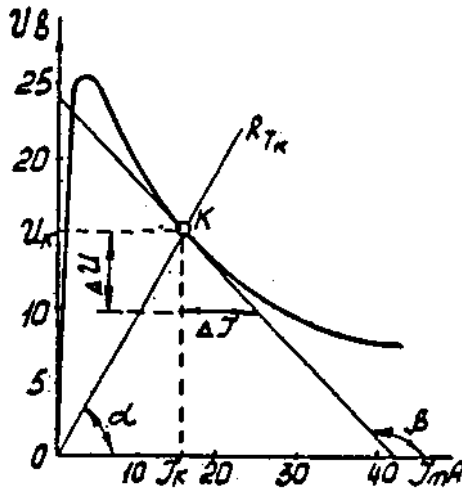


Рис. 1.1 Пример вольт-амперной характеристики.

$$R_T = U_T I_T = I_T^2 R_T = \frac{U_T^2}{R_T} = b(T - T_0) \quad (1.4)$$

откуда

$$I_T = \sqrt{\frac{b}{A} e^{\frac{B}{T}} (T - T_0)} \quad (1.5)$$

$$U_T = \sqrt{b A e^{\frac{B}{T}} (T - T_0)} \quad (1.6)$$

где  $b$  – коэффициент рассеяния, учитывающий все виды распространения тепла от рабочего тела (теплопроводность, конвекцию, излучение).

Считая, что  $b = \text{const}$ , продифференцируем уравнение (1.6) по  $T$ . Приравнявая к нулю первую производную, получим:

$$T_{\max}^2 - B T_{\max} + B T_0 = 0 \quad (1.7)$$

Температура резистора в точке максимума вольтамперной характеристики равна:

$$T_{\max} = \frac{B}{2} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4T_0}{B}} \right) \quad (1.8)$$

Температура, а следовательно и сопротивление в точке максимума ВАХ зависят от температуры окружающей среды и не зависят от коэффициента рассеяния. Из выражений (1.5) и (1.6) следует, что ВАХ зависят от температуры среды  $T_0$  и коэффициента рассеяния  $b$ . (рис. 1.2, 1.3).

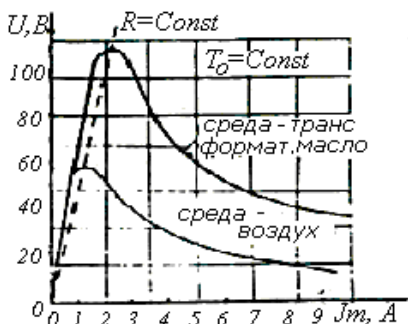


рис.1.2. ВАХ терморезистора при различных окружающих средах.

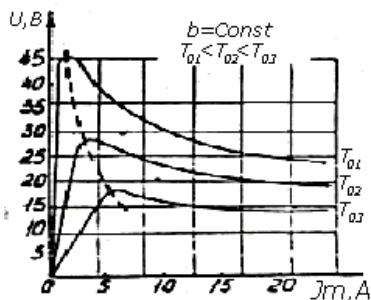


рис.1.3. Семейство ВАХ терморезистора при различных значениях температуры окружающей среды

В каждой точке статической ВАХ различают статическое и дифференциальное сопротивление

$$R_T = \frac{U}{I} \text{ и } r_d = \frac{dU}{dI} .$$

Статическое сопротивление пропорционально тангенсу угла  $\alpha$ , образованного секущей, проведённой из начала координат в рассматриваемую точку ВАХ, и осью токов. Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла  $\beta$ , образованного касательной в рассматриваемой точке характеристики с осью токов (см. рис. 1.1.).

Коэффициент рассеяния  $b$  – представляет собой мощность, рассеиваемую терморезистором, при разности температур ПТР и окружающей среды в один градус.

Величина коэффициента рассеяния зависит от материала и размеров ПТР, от характера среды и её состояния: скорости движения, влажности, давления и т.д. Для нахождения коэффициента рассеяния необходимо:

- 1) выбрать на ВАХ ряд точек в подсчитать для них по значениям тока и напряжения мощность, выделяемую в ПТР, и его сопротивление;
- 2) с помощью температурной характеристики по подсчитанным выше сопротивлениям найти значения температуры, соответствующие каждой точке;
- 3) вычислить разность температур рабочего тела ПТР и окружающей среды для каждой точки;
- 4) вычислить коэффициент рассеяния из уравнения энергетического баланса

$$b = \frac{UI}{T - T_0} \quad \text{мВт/град.} \quad (1.9)$$

Температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_T$  – относительное изменение сопротивления ПТР при изменении температуры на один градус

$$\alpha_T = \frac{dR}{R} \frac{1}{dT} 100\% = -\frac{B}{T^2} 100\% \text{ град.} \quad (1.10)$$

Тепловая инерционность терморезисторов характеризуется постоянной времени  $\tau$ . Она равна времени, в течение которого температура ПТР при его свободном охлаждении понижается на 63% от первоначальной разности температур ПТР и окружающей среды (рис.1.4). Величина  $\tau$  лежит в широких пределах - от десятых долей до десятков секунд.

Определение постоянной времени достаточно больших ПТР производится следующим образом. ПТР разогревается до определенной температуры  $T_1$  в термостате. Вычитая из этой температуры, температуру среды  $T_0$ , находят начальное значение перегрева  $\theta_{\text{нач}}$ . Остаётся определить значение сопротивления, которое будет иметь ПТР после уменьшения температуры перегрева на 63%, т.е. в тот момент, когда температура рабочего тела примет значение  $(T_0 + 0,37\theta_{\text{нач}})$ . Соответствующее значение сопротивления находят по температурной характеристике. На эту величину настраивают измерительный мост. Затем, разогретый ПТР быстро переносится в среду с температурой  $T_0$ . При этом замеряется время  $\tau$  с момента переноса ПТР до достижения им температуры  $(T_0 + 0,37\theta_{\text{нач}})$ . Фиксируемой по измерительному мосту.

При высоких температурах в полупроводниковом материале терморезистора могут происходить необратимые структурные изменения, в результате которых изменяются его параметры. Наибольшую, температуру, при которой ПТР сохраняет стабильность параметров при длительной эксплуатации, называют предельно допустимой  $T_{\text{доп}}$ .

Соответствующая этой температуре мощность рассеяния называется максимально допустимой мощностью рассеяния  $P_{\text{макс}}$ .

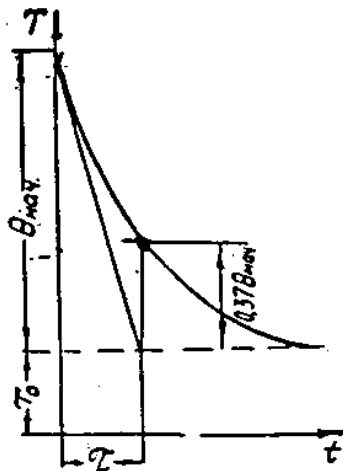


Рис.1.4. Определение постоянной времени

### Методика снятия ВАХ ПТР.

Снятие ВАХ имеет особенности, обусловленные инерционностью ПТР и наличием отрицательного участка на его ВАХ. Схема для снятия ВАХ изображена на рис.1.5,а. Существует два метода снятия этих характеристик. Первый метод основан на использовании постоянного добавочного сопротивления и источника регулируемого напряжения  $U$ . Изменяя напряжение  $U$ , можно снять всю ВАХ (рис.1.5,б). При этом величина добавочного сопротивления  $R$  должна быть больше максимального отрицательного дифференциального сопротивления ПТР. В противном случае характеристику полностью снять не удастся. Второй метод снятия ВАХ ПТР основан на изменении величины добавочного сопротивления  $R$ . Напряжение  $U$  при этом постоянно (рис.1.5, в).

Вследствие тепловой инерционности ПТР измерения при снятии ВАХ должны проводиться после некоторой выдержки, чтоб установилось тепловое равновесие между ПТР и окружающей средой. При снятии ВАХ необходимо поддерживать постоянными температуру окружающей среды и условия теплоотдачи ПТР.

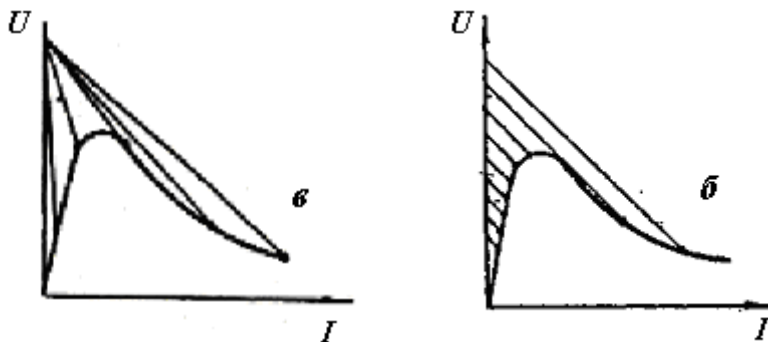


Рис. 1.5. Снятие ВАХ терморезистора.

При выполнении лабораторной работы необходимо использовать: универсальный источник питания (УИП); вольтметр; миллиамперметр; полупроводниковые терморезисторы; добавочное сопротивление; термостат; измерительный мост; секундомер; термометр; монтажная плата с проводниками.

**Задание.**

1. Построить температурную характеристику ПТР по двум значениям сопротивлений, замеренным с помощью измерительного моста при определенных температурах (по заданию преподавателя).

2. Вычислить температурный коэффициент ПТР по данным п.1 для  $T_0$ .

3. Собрать измерительную схему для снятия ВАХ ПТР.

*Внимание!* Без добавочного сопротивления схему не включать!

4. Снять ВАХ терморезисторов при заданной температуре.

5. Рассчитать коэффициент рассеяния  $b$ .

6. Построить (по заданию преподавателя) семейство ВАХ одного типа ПТР при различных температурах.

7. Построить зависимость статического, и дифференциального сопротивления ПТР от тока при определённой температуре окружающей среды по данным п.6.

8. Экспериментально определить значение постоянной времени  $\tau$ .

Для удобства вычисления полученные результаты по приведенной форме заносятся в таблицу.

№ п/п	U, В	I, мА	P, мВт	R, кОм	T, К	T-T <sub>0</sub>	b, $\frac{мВт}{град}$	$r_g = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ , кОм	$\tau = \sqrt{\frac{b}{R_r}(T - T_0)}$ мА



### Вопросы для подготовки к работе.

1. Основные параметры ПТР.
2. Основные характеристики ПТР.
3. Влияние изменения  $T_0$  на деформацию ВАХ.
4. Влияние изменения  $b$  на деформацию ВАХ.
5. Как подсчитать коэффициент рассеяния?
6. Как определять  $\alpha_T$  графически?
7. Определение постоянной времени  $\tau$ .
8. Особенности снятия ВАХ.
9. Как построить семейство ВАХ терморезистора?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ТЕРМОРЕЗИСТОРАМИ.

Цель работы: исследование динамических характеристик ПТР расчет и настройка реле времени; сравнение расчета с результатами эксперимента.

Различают два режима работы ПТР – линейный и нелинейный.

*Линейный режим* работы соответствует начальному (линейному) участку ВАХ, когда ток, протекающий через терморезистор, не вызывает заметного разогрева его рабочего тела и его сопротивление определяется только температурой окружающей среды  $T_0$ . В линейном режиме работы ПТР рассматривается как безинерционное сопротивление.

*Нелинейный режим* работы терморезистора соответствует превышению температуры  $T$ - рабочего тела ПТР над температурой окружающей среды ( $T > T_0$ ) на некоторую величину, пропорциональную рассеиваемой мощности, т.е. рабочая точка лежит на нелинейном участке ВАХ. При нелинейном режиме работы, в случае изменения одного или нескольких параметров, характеризующих режим работы цепи ( $U_{\text{ц}}, T_0, b, r$ ) возникает переходный процесс, который сопровождается перемещением рабочей точки, а следовательно, изменением тока в цепи (рис. 2.1).

Переходный процесс сопровождается разогревом рабочего тела ПТР протекающим по нему током. При этом мощность, выделяемая на ПТР, частично рассеивается в окружающую среду, а частично идет на повышение температуры ПТР, т.е. в любой момент переходного процесса справедливо уравнение:

$$U'_R I'_k = H \frac{dT}{dt} + b(T - T_0) \quad (2.1)$$

где  $U'_k$  - мгновенное значение напряжения ПТР, В;

$I'_k$  - мгновенное значение тока через ПТР, А ;

$H$  - теплоемкость, Вт·с/град;

$t$  - время, с;

$T$  - мгновенное значение температуры ПТР, К;

$T_0$  - температура окружающей среды, К ;

$b$  - коэффициент рассеяния, Вт/град.

Для расчета переходного процесса, когда известна статическая ВАХ ПТР, удобно использовать выражение:

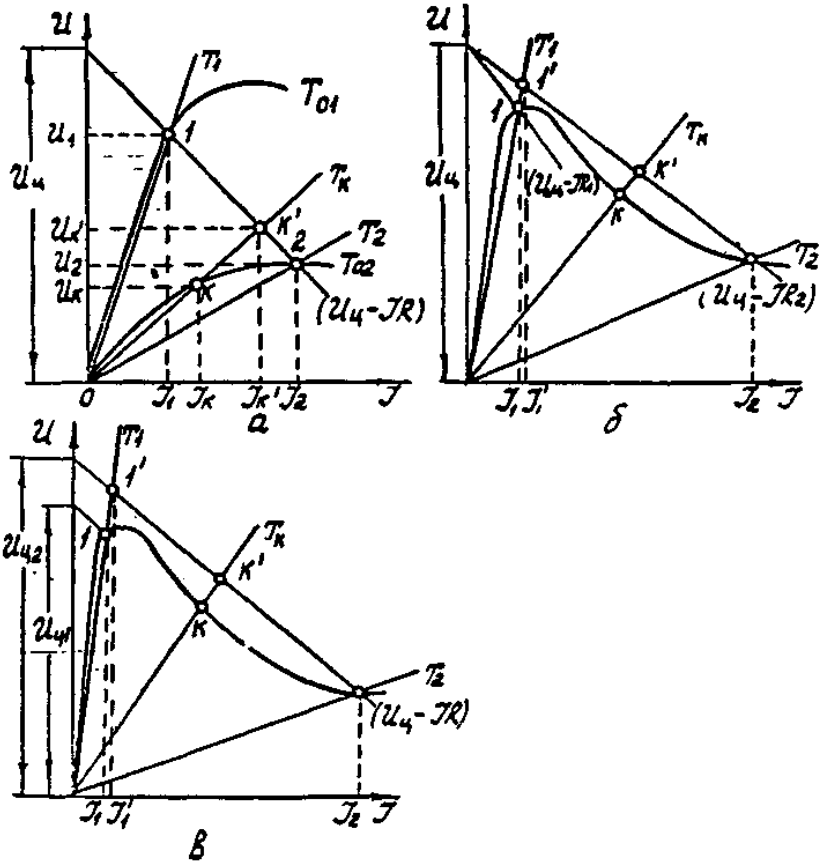


Рис..2.1. Возникновение переходного процесса в цепи с ПТР при скачкообразном изменении одного из параметров: а – температуры среды; б – линейного сопротивления; в – питающего напряжения.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{U_K I_K' - U_K I_K}{H}, \quad (2.2)$$

где  $U_K I_K = b(T - T_0)$  – мощность, рассеиваемая на ПТР в установившемся режиме нагрева.

Располагая графиком зависимости скорости изменения температуры от самой температуры  $\frac{dT}{dt} = f(T)$  можно построить динамические характеристики

$$T = f_1(t)$$

$$I = f_2(t)$$

Характер и продолжительность переходного процесса, вызванного скачкообразным изменением параметров цепи, будут меняться в зависимости от значений этих параметров и их комбинаций. Время протекания переходных процессов, возникающих в электрической цепи содержащей ПТР, может быть использовано для получения выдержек времени различной продолжительности.

Простейшая схема реле времени состоит из электромагнитного реле, включенного последовательно с ПТР (рис.2.2). Выдержка осуществляется за счет времени, необходимого для нарастания тока до значения тока срабатывания реле. Началом отсчета является момент подключения цепи с ПТР к источнику напряжения.

Для выполнения лабораторной работы используются: универсальный источник питания; полупроводниковый терморезистор; электромагнитное реле постоянного тока РЭС-10; добавочное сопротивление (магазин сопротивлений); термостат; секундомер; термометр; монтажная плата с проводниками и сигнальной лампой.

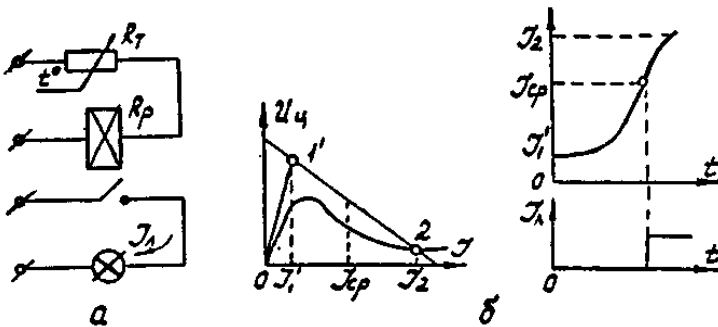


Рис..2.2 а – принципиальная электрическая схема реле времени, б – вольт-амперные и динамические характеристики.

### Задание.

1. Графическим методом определить параметры цепи, состоящей из ПТР и линейного резистора.

Основные параметры РЭС-10:

$$R_p = 4,5 \pm 0,625 \text{ кОм}$$

$$I_{CP} = 8 \text{ мА}$$

(статическая ВАХ ПТР известна из лабораторной работы № 1).

2. Рассчитать переходный процесс в данной цепи, для чего

построить графики зависимостей:  $\frac{dT}{dt} = f(T)$  (необходимые для расчета

данные берутся непосредственно из чертежа);  $T = f_1(t)$ ,  $I = f_2(t)$

Определить время переходного процесса (время срабатывания реле).

3. Собрать схему реле времени и определить время переходного процесса с момента включения до момента срабатывания реле. Сравнить экспериментально замеренное время срабатывания с расчетным.

### Вопросы для подготовки к работе.

Как влияет на характер и продолжительность переходного процесса скачкообразное изменение: добавочного сопротивления; напряжения питания; коэффициенты рассеяния; температуры окружающей среды?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ И ИНДУКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Цель работы: Изучение основ функционирования индуктивных и индукционных преобразователей с различными магнитными системами в функции линейного и углового перемещения в зависимости от схем включения рабочих обмоток, видов нагрузки; ознакомление с основными параметрами индуктивных и индукционных преобразователей.

### 1. Общие сведения об индуктивных и индукционных преобразователях.

Индуктивные преобразователи являются преобразователями параметрического типа. Для преобразования механического перемещения в электрический сигнал здесь используется изменение индуктивности дросселей с переменным воздушным зазором.

В индукционных преобразователях используется изменение взаимной индуктивности обмоток (коэффициента взаимоиндукции) при перемещении подвижных частей. Такие устройства называют ещё трансформаторными индуктивными преобразователями.

В общем случае индуктивные и индукционные преобразователи в отношении электрических сигналов представляют собой четырёхполосники, параметры (индуктивность и взаимоиндуктивность) которых зависят от значения входной величины – механического перемещения якоря  $X$ .

Индуктивные и индукционные преобразователи используются в измерительных устройствах и САУ, работают на частотах 50 Гц и выше.

## 2. Индуктивные преобразователи.

### 2.1 Простейший индуктивный преобразователь.

Схема простейшего индуктивного преобразователя с плоским якорем приведена на рис.3.1

Обмотка 1 через сопротивление нагрузки  $R_H$  подключена к сети переменного тока. Магнитный поток  $\Phi$ , создаваемый переменным током, протекающим по обмотке 1, проходит через магнитопровод 2, воздушный зазор 4 и замыкается через подвижный якорь 3. Магнитопровод и якорь изготавливаются шихтованными из материала с достаточно большой магнитной проницаемостью и малыми потерями (электротехнические стали, пермоллои и т. д.) на гистерезис и вихревые токи.

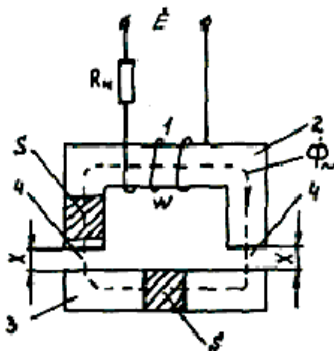


Рис.3.1 Простейший индуктивный преобразователь

Вследствие того, что магнитное сопротивление ферромагнитного якоря 3 и сердечники 2 мало, индуктивность обмотки резко изменяется при изменении параметров воздушного зазора. При увеличении длины  $X$  рабочего воздушного зазора (РВЗ) общее магнитное сопротивление возрастает, индуктивность обмотки падает, и ток в цепи нагрузки возрастает. Наоборот, приближение якоря к магнитопроводу сопровождается ростом индуктивного сопротивления обмотки и следовательно, уменьшением тока в ней.

Если длина  $X$  воздушного зазора невелика в сравнении с шириной магнитопровода, то поток рассеяния мал и индуктивность обмотки  $L$  с достаточной точностью можно выразить формулой

$$L = \frac{W^2}{R_{ж} + 2 \frac{x}{\mu_0 S}}, \quad (3.1)$$

где  $L$  - индуктивность, Гн;

$W$  - число витков обмотки 1;

$X$  - длина воздушного зазора, м;

$S$  - площадь сечения потока в воздушном зазоре, принимается равной площади сечения стержней магнитопровода,  $m^2$ ;

$R_{ж}$  - сопротивление магнитопровода,  $Gн^{-1}$ ;  $\mu_0$  - магнитная постоянная,  $Gн \cdot m^{-1}$ .

Если длина магнитного зазора соизмерима с шириной, то его магнитное сопротивление значительно больше магнитного сопротивления железа

$$\frac{2X}{\mu_0 S} \gg R_{ж} = \frac{L_{ж}}{\mu S} \quad (3.2)$$

и формула (3.1) примет вид

$$L = \mu_0 \frac{W^2 S}{2X}, \quad (3.3)$$

При синусоидальном напряжении сети и выполнении условия (3.2) ток в обмотке 1 практически синусоидален, т.к. при условии (3.2) преобладает линейная зависимость его от длины рабочего воздушного зазора.

$$I = \frac{E}{\sqrt{R_{ж}^2 + \omega^2 L^2}}, \text{ т.к. } \omega L \gg R_{ж}, \text{ то } I = \frac{\dot{E}}{W^2 \mu_0 \omega S} \cdot X \quad (3.4)$$

Итак, пренебрегая активным сопротивлением обмотки, магнитным сопротивлением железа, потоками рассеяния, мы получим линейную зависимость тока нагрузки от перемещения  $X$  якоря.

Согласно сделанным допущениям сопротивление цепи чисто индуктивное, сдвиг фаз между напряжением и током равен  $90^\circ$ .

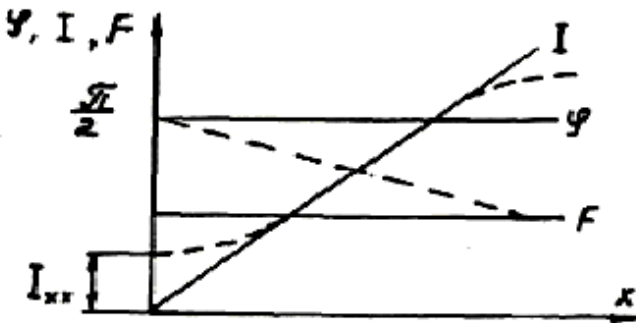


Рис.3.2 Характеристики однофазного индуктивного преобразователя с плоским якорем.

Реальная характеристика датчика отличается от полученной идеализированной характеристики в области малых и больших зазоров. Эта реальная характеристика на рис.3.2 обозначена пунктиром. Отличие реальной характеристики, идеализированной в области малых РВЗ, обусловлено главным образом, магнитным сопротивлением железа, а при больших - наличием активного сопротивления цепи обмотки. Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи реального датчика (пунктирная линия) уменьшается с увеличением зазора, что и показано на рис.3.2.

Рассмотренный простейший индуктивный преобразователь почти не используется в САУ и измерительных схемах по следующим причинам: Во-первых, это преобразователь одноконтурный; во-вторых, при значительной мощности сигнала выходной цепи на якорь действует значительная сила притяжения

$$F = \frac{1}{2} |I|^2 \left| \frac{dL}{d\alpha} \right|,$$

или момент

$$M = \frac{1}{2} |I|^2 \left| \frac{dL}{d\alpha} \right|,$$

где  $\alpha$  – угол поворота якоря.

если воспользоваться приближённым выражениями (3.3) и (3.4), то получим

$$F = -\frac{1}{2} a \frac{|E|}{\omega}, \quad (3.5)$$

т.е. сила притяжения якоря пропорциональна коэффициенту чувствительности по току

$$a = \frac{|E|}{\mu \cdot \omega s}$$

и обратно пропорциональна частоте питания и не зависит от длины рабочего воздушного зазора (рис.3.2).

## 2.2 Двухтактный индуктивный преобразователь.

Широкое применение имеют двухтактные индуктивные преобразователи, собранные по дифференциальной или мостовой схеме.

Дифференциальная схема состоит из двух независимых цепей, разность токов в которых служит выходным сигналом. На рис.3 изображена схема включения двухтактного преобразователя с плоским якорем. Выходной сигнал равен разности токов  $I_1 - I_2$ . Механическим входным сигналом служит смещение якоря  $X$  относительно среднего положения. При  $X=0$  длина воздушных зазоров одинакова и равна  $X_0$ , индуктивности обмоток 1 и 2 равны между собой, токи  $I_1$  и  $I_2$  одинаковы и ток через нагрузку, определяемый разностью токов  $\Delta I = I_1 - I_2$  равен 0.

При смещении якоря один из токов уменьшается, другой увеличивается и появляется выходной сигнал. Фаза выходного сигнала при смене направления отклонения входного сигнала относительно среднего положения меняется на  $180^\circ$ . Датчики с плоским якорем применяются для измерения малых перемещений от нескольких микрон до 2 – 3 мм. При больших перемещениях применять индуктивные преобразователи с плоский якорем нецелесообразно.

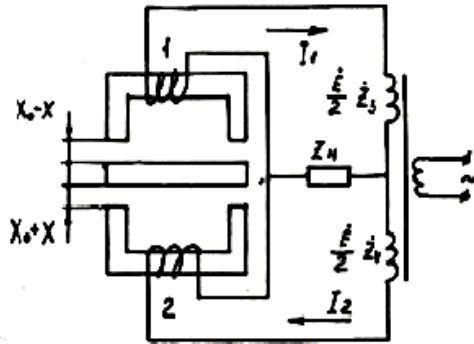


Рис.3.3 Дифференциальная схема включения обмоток двухтактного преобразователя с плоским якорем.

Аналогично функционирует преобразователь, собранный по мостовой схеме (рис.3.4). При  $X=0$  выполняется условие равновесия моста

$$\dot{Z}_1(x) \cdot \dot{Z}_4 = \dot{Z}_2(x) \cdot \dot{Z}_3$$

следовательно, в измерительной диагонали  $\dot{U}_H = 0$ . При перемещении якоря равновесие моста нарушается и  $\dot{U}_H \neq 0$ . По нагрузке  $Z_H$  протекает ток.

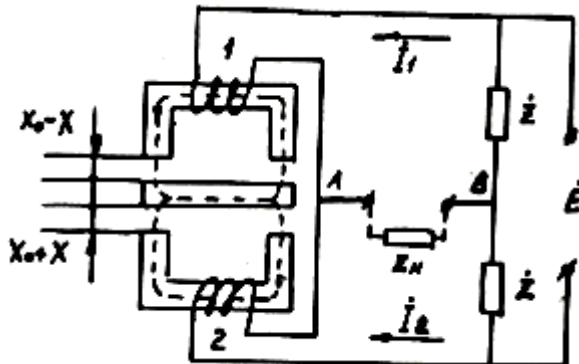


Рис.3.4 Мостовая схема включения обмоток двухтактного преобразователя с плоским якорем.



Для измерения перемещений до нескольких сантиметров используются преобразователи плунжерного типа (рис.3.5).

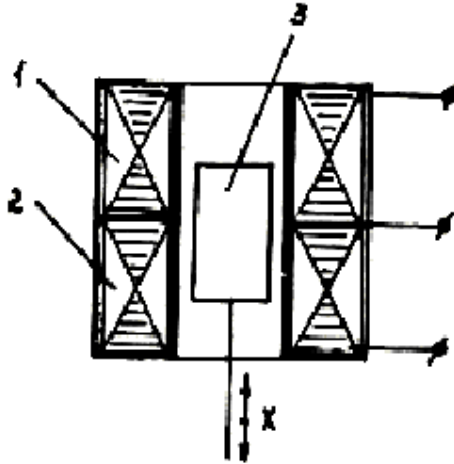


Рис.3.5 Индуктивный преобразователь плунжерного типа.

Преобразователь плунжерного типа представляет собой соленоид с одной или двумя обмотками. Для уменьшения магнитного потока, замыкающегося через воздух, катушку соленоида заключают в стальной кожух. Перемещая якорь 3, выполненный в виде плунжера (сердечника), можно менять длину РВЗ и, следовательно, индуктивность катушек 1 и 2. Обмотки 1 и 2 могут соединяться как по дифференциальной схеме, так и мостовой.

Индуктивный реверсивный преобразователь обладает двухтактной статической характеристикой. В пределах изменения входного сигнала можно выбрать достаточно большой (по сравнению с однотактным преобразователем) линейный (рис.3.6) рабочий участок статической характеристики.

Сила, действующая на якорь преобразователя (дифференциальная схема), равна

$$F = \frac{1}{2} (|I_1|^2 - |I_2|^2) \frac{L_0}{X_{\max}}$$

и по величине может быть меньше, чем в однотактной схеме.

Отличие мостовой схемы от дифференциальной заключается лишь в том, что выходной величиной в мостовой схеме служит разность напряжений двух цепей, которые при наличии нагрузки не являются независимыми.

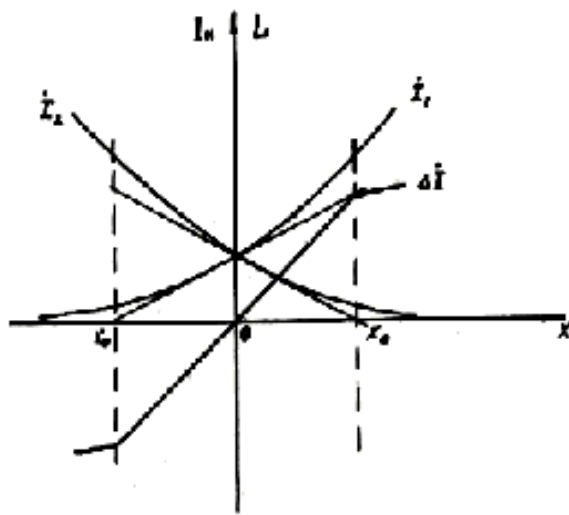


Рис.3.6 Статическая характеристика индуктивного реверсивного преобразователя.

Напряжение  $U_0(x)$  (напряжение холостого хода) на выходе (рис.3.4) при отключенной нагрузке равно

$$\dot{U}_0(x) = \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_4 - \dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2)(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4)} \dot{E}$$

При включённой нагрузке

$$\dot{U}_{ВЫХ}(x) = \frac{\dot{U}_0(x)}{\dot{Z}_{ВЫХ} + \dot{Z}_H} \dot{Z}_H$$

где  $Z_{ВЫХ}$  – внутреннее (выходное) сопротивление моста при пренебрежимо малом сопротивлении источника.

Согласно обоим свойствам четырёхполосников максимальная активная мощность в нагрузке выделяется при равенстве активного сопротивления нагрузки и активной составляющей внутреннего сопротивления, т.е.

$$R_H = R_{ВЫХ}, X_H = -X_{ВЫХ} \quad (3.6)$$

Реактивное сопротивление  $X_{ВЫХ}$  схем преобразователей рассматриваемого типа являются индуктивным, поэтому для выполнения условия  $X_H = -X_{ВЫХ}$ , реактивное сопротивление нагрузки должно быть ёмкостным. Схемы, где обеспечивается выполнение условия (3.6), называются резонансными. Для выполнения условия резонанса последовательно с нагрузкой включают конденсатор. Индуктивное внутреннее сопротивление датчика меняется при

перемещении якоря, поэтому строгое выполнения условия резонанса при заданной емкости конденсатора имеет место для одного положения якоря.

В некоторых случаях нагрузка подключается к индукционному преобразователю через повышающий трансформатор (рис.3.7).

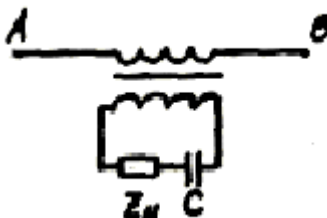


Рис.3.7 Включение нагрузки через повышающий трансформатор в мостовой схеме.

При таком включении выгодно помещать конденсатор на высоковольтной стороне, т.к. условие резонанса в этом случае выполняется при меньшей ёмкости конденсатора.

### 3. Индукционные ( трансформаторные) преобразователи.

#### 3.1. Принцип работы.

Помимо преобразователей, принцип функционирования которых основан на изменении индуктивности (коэффициента самоиндукции), применяются преобразователи в которых используется изменение взаимной индукции обмоток (коэффициента взаимоиנדукции  $M = \sqrt{L_1 L_2}$ ) при перемещении подвижных частей.

Такие устройства называют трансформаторными или индукционными преобразователями.

На рис.3.8. изображены две схемы трансформаторных преобразователей. В схеме рис. 8а при смещении якоря 1 относительно среднего положения взаимные индуктивности обмотки питания 2 со встречно включенными обмотками 3 выходного сигнала становятся не одинаковыми, и на выходе появляется напряжение  $U$ . Фаза напряжения меняется на противоположную при изменении знака смещения якоря.

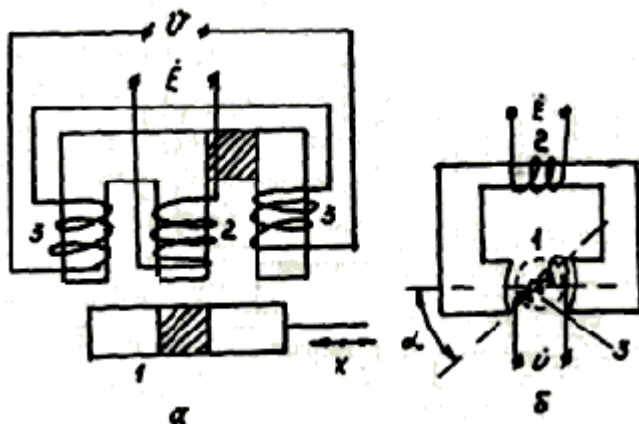


Рис.3.8. Трансформаторные преобразователи.

В преобразователе (схема рис.3.8.б) поворотная катушка 1 находится в радиальном поле, создаваемым обмоткой 2 в зазоре между полюсом и цилиндрическим сердечником 3. При одинаковом РВЗ поток, пронизывающий катушку, пропорционален углу  $\alpha$  и преобразователь имеет линейную характеристику в широком диапазоне изменения входного сигнала  $\alpha$  (характеристика одноконтактная). Индукционные преобразователи имеют такие же статические характеристики как и индуктивные. Расчёт сил, действующих на якорь трансформаторных преобразователей аналогичен.

### 3.2. Общие свойства преобразователей.

Отсутствие скользящих контактов, прочность конструкции обуславливает высокую надёжность индуктивных и индукционных преобразователей. Достоинствами их являются также высокие чувствительность и разрешающая способность. Например, коэффициент чувствительности дифференциального преобразователя с плоским якорем часто составляет несколько сот вольт на 1 мм, а разрешающая способность измеряется сотыми долями микрона. Надо заметить, что высокая разрешающая способность достигается тщательным экранированием и регулировкой цепей преобразователя.

Изготавливаются преобразователи с выходной мощностью в несколько десятков ватт. При повышенной частоте питания объем и вес приходящийся на единицу выходной мощности, невелики. Индукционные преобразователи обладают значительным КПД.

К недостаткам относятся трудность регулировки, трудность получения нулевого сигнала на выходе.

Для определения фазы выходного сигнала с индуктивными и индукционными преобразователями используют демодуляторы (фазочувствительные устройства).



- 7) трансформатор питания;
- 8) вольтметр выходного напряжения;
- 9) переключатель работы П.

Питание лабораторной установки осуществляется от сети 220 В частотой 50 Гц. Схема блока питания даётся в приложении.

#### **6. Программа работы и порядок её выполнения.**

1. Изучить схему лабораторной установки.
2. Построить график статической характеристики преобразователя соленоидного типа.
3. Построить график статической характеристики трансформаторного преобразователя с поворотным якорем.
4. Определить статические чувствительности в заданной точке (по указанию преподавателя).

Для выполнения лабораторной работы необходимо:

1. Включить установку в сеть переменного тока напряжением 220В, частотой 50 Гц.
2. Снять показания прибора при изменении линейного перемещения; величину перемещения фиксировать по часам индикатора.
3. Построить статическую характеристику.
4. Снять показания приборов при изменении углового перемещения.
5. Построить статическую характеристику.
6. Сделать выводы.

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ДАТЧИКА**

Цель работы:

- ознакомление с конструктивными схемами и принципом действия емкостных датчиков;
- экспериментальное исследование емкостного датчика углового положения.

Лабораторная работа выполняется в течение одного занятия и включает два этапа:

- выполнение задания для самостоятельной работы во внеучебное время
- выполнение экспериментальной работы в аудиторное время.

Задание для самостоятельной работы заключается в том, что студенты должны изучить принцип действия емкостных датчиков и методов их расчета.

О выполнении задания студенты отчитываются перед преподавателем в аудиторное время. Оценкой выполнения задания является допуск к выполнению экспериментальных исследований.

### 1. Общие сведения

Принцип действия емкостных датчиков основан на свойстве конденсатора изменять емкость с изменением геометрических размеров или диэлектрической постоянной. При помощи емкостных датчиков можно измерить геометрические размеры, влажность, состав изоляционного материала и т.п. Известно, что емкость плоского конденсатора (пФ)

$$C = \frac{0,088 \varepsilon S}{d}, \quad (4.1)$$

$\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость (пФ/см).

$S$  – действующая площадь пластин (обкладок), составляющих конденсатор ( $\text{см}^2$ );

$d$  – толщина диэлектрика (или зазора), (см).

Из формулы (4.1) видно, что емкость может изменяться в зависимости от трех величин -  $\varepsilon$ ,  $S$ ,  $d$ . Следовательно, в зависимости от того на какой параметр воздействует величина  $x$ , можно выполнить соответствующий емкостной датчик.

На рис. 4.1а изображен емкостной датчик, в котором измеряемая величина  $x$  вызывает изменение зазора  $d$  между пластинами, из которых 1 – неподвижная, 2 – подвижная. Такой датчик применяется для измерения небольших перемещений. Если обозначить начальную емкость (до измерения) через  $C_0$ , а в момент измерения  $C_1$ , то абсолютное изменение емкости:

$$\Delta C = C_0 - C_1 = 0,088 \cdot \frac{\varepsilon S}{d} \cdot \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d},$$

а относительное изменение:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta d}{d \pm \Delta d}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta d$  - изменение (смещение) зазора между пластинами, (см рис. 4.1а).

В формуле (4.2) знак + соответствует уменьшению емкости, а – увеличению.

Чувствительность емкостного датчика равна отношению относительного приращения емкости к приращению линейного размера  $\Delta d$ .

$$S_d = \frac{\Delta C / C}{\Delta d} = \frac{1}{d \pm \Delta d}. \quad (4.3)$$

На рис.4.1.б показана зависимость относительного изменения емкости  $\Delta C / C$  от относительного изменения зазора  $\Delta d / d$ .

В случае уменьшения зазора ( $d - \Delta d$ ) кривая А круто поднимается вверх и при  $\Delta d/d \rightarrow 1$  стремиться к бесконечности. При этом увеличивается чувствительность датчика.

В случае увеличения зазора ( $d + \Delta d$ ) кривая Б при  $\Delta d/d \rightarrow \infty$  положе, чем кривая А, поднимается вверх и приближается к предельному значению  $\Delta C/C = 1$ . При этом чувствительность датчика уменьшается. Обе кривые (А,Б) будут иметь линейный характер в том случае, когда зазор изменяется не более чем на 5%, т.е  $\Delta d = \pm 0,05d$ . При этом относительное изменение емкости приблизительно равно относительному зазору (независимо от направления смещения подвижного электрода). Следует отметить, что уменьшение расстояния между электродами ограничено электрическим пробоем диэлектрика и ограничено 30мк.

На рис.4.1.в показана схема дифференциального датчика. Применение его позволяет уменьшить действие механической силы и увеличить чувствительность мостовой схемы. Конструкция дифференциального датчика состоит из подвижной пластины 1. Расположенной между двумя неподвижными пластинами 2 и 3. Подвижная пластина закреплена с двух сторон на упругих подвесках 4 и 4' с малой жесткостью и может перемещаться вверх или вниз под действием измеряемого усилия Р. Во избежание утечки зарядов обе пластины (2 и 3) тщательно изолированы от корпуса изолирующими прокладками 5 и 5'. При перемещении подвижной



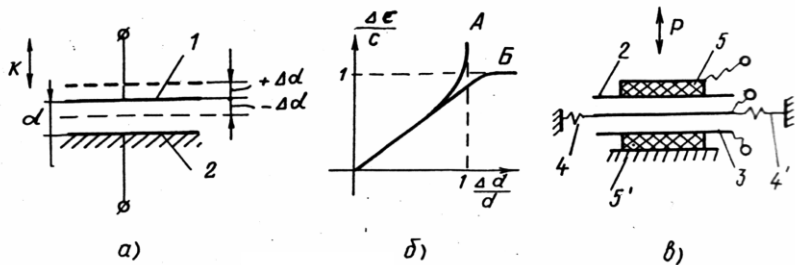


Рис.4.1

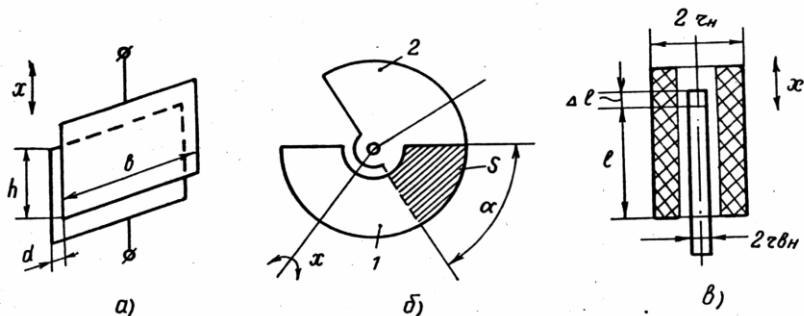


Рис.4.2

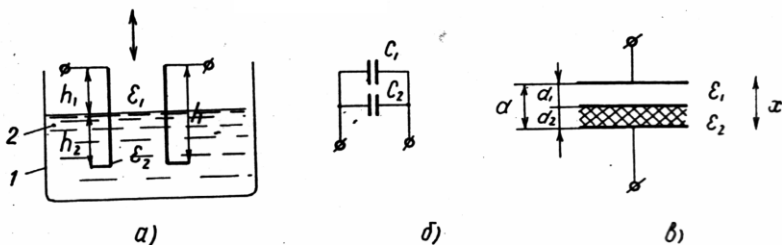


Рис.4.3

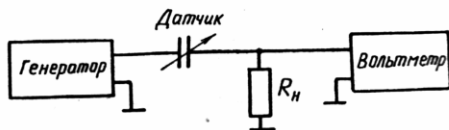


Рис.4.4

пла  
зна

соседние плечи мостовой схемы, благодаря чему увеличивается напряжение в измерительной диагонали моста. Для получения высокой чувствительности емкостные датчики включаются в резонансные контуры.

На рис.4.2.а показан датчик для измерения линейных перемещений, в котором входная величина  $x$  преобразуется за счет изменения площади пластин  $S$ . Здесь  $b$ ,  $h$ ,  $d$  – соответственно ширина, высота и расстояние между обкладками конденсатора. Используя обозначения, принятые на рис.4.1.а, находим абсолютные значения емкости

$$\Delta C = C_0 - C = \frac{0,088 \varepsilon \Delta S}{d} = \frac{0,088 \varepsilon b \Delta h}{d}. \quad (4.4)$$

Обычно для увеличения чувствительности датчика применяют многопластинчатые конденсаторы, в этом случае емкость (пФ)

$$C = \frac{0,088 \varepsilon S(n-1)}{d}, \quad (4.5)$$

где  $S$  – рабочая площадь пластины ( $\text{см}^2$ );  $n$  – общее число пластин ;  $d$  – расстояние между пластинами (см).

Абсолютное изменение емкости:

$$\Delta C = \frac{0,088(n-1)\varepsilon \Delta S}{d}. \quad (4.6)$$

На рис.2.б изображен датчик роторного типа для преобразования угловых перемещений. Примером такого датчика может быть обычный воздушный конденсатор переменной емкости, применяемый для настройки радиоприемников. Переменной величиной в нем является площадь пластин. В системах автоматики и робототехники такие датчики применяются для преобразования угла поворота в емкость.

На рис.4.2.б приняты следующие обозначения: 1 – неподвижная пластина (статор), жестко закреплена на неподвижной детали; 2 – подвижная пластина (ротор), жестко скреплена с осью 3, она может свободно поворачиваться относительно неподвижной пластины 1, при этом расстояние между пластинами остается неизменным

Рабочая площадь (заштрихована) зависит от угла поворота  $\alpha$  пластины 2.

Для увеличения емкости датчика применяют систему, состоящую из нескольких подвижных и неподвижных пластин. При этом емкость датчика:

$$C = C_0 + \frac{0,088 \varepsilon \psi \alpha}{d}, \quad (4.7)$$

где  $C_0$  – начальная емкость датчика ;  $\psi$  – изменение площади на единицу поворота  $\alpha$ ;  $\alpha$  – угол поворота подвижных пластин относительно неподвижных.

На рис.4.2.в изображен цилиндрический датчик с переменной площадью для измерения перемещений более 1мм. В этом случае :

$$C = \frac{0,0882 \pi \varepsilon l}{\ln \frac{r_H}{r_{BH}}}, \quad (4.8)$$

где  $l$  – длина перекрываемой части обкладок конденсатора;

$r_{вн}, r_{н}$  – радиусы внутренней и внешней обкладок.

При смещении внутреннего цилиндра (обкладки) на величину  $\Delta l$  абсолютное изменение емкости :

$$\Delta C = \frac{0,0882 \pi \varepsilon \Delta l}{\ln \frac{r_{н}}{r_{вн}}} \quad (4.9)$$

Достоинством данного датчика является большая емкость при не больших габаритах по сравнению с другими типами датчиков.

Из анализа работы датчиков, рассмотренных выше (за исключением датчика изображенного на рис.4.1.а), видно что между изменением емкости  $\Delta C$  и изменением площади  $\Delta S$  (или перемещением  $\Delta h, \Delta \alpha, \Delta l$ ) существует линейная зависимость.

Емкостные датчики с переменной диэлектрической проницаемостью могут быть двух типов: с перемещением диэлектрика перпендикулярно или параллельно плоскости пластин.

На рис.4.3.а изображен датчик для измерения уровня жидкости (первый тип). Здесь 1- бак, 2- жидкость. При различных величинах диэлектрической проницаемости воздуха  $\varepsilon_1 = \varepsilon_B$  и перемещающегося диэлектрика  $\varepsilon_2$  (жидкость) образуются два конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ , соединенные параллельно. Эквивалентная схема рассматриваемого датчика приведена на рис.4.3.б.

Общая емкость:

$$C = C_1 + C_2 = \frac{0,088 \varepsilon_B b h_1}{d} + \frac{0,088 \varepsilon_2 b h_2}{d}, \quad (4.10)$$

где  $C_1$  – емкость верхней части бака высотой  $h_1$ , заполненная воздухом ;  $C_2$  – емкость нижней части бака, заполненная жидкостью, уровень  $h_2$  которой изменяется ;  $b$  - ширина обкладки ;  $h$  - полная высота электрода.

Так как диэлектрическая проницаемость токонепроводящей среды значительно больше диэлектрической проницаемости воздуха ( $\varepsilon_B = 1$ ), то емкость такого датчика при изменении уровня меняется очень резко и в широких пределах. Учитывая, что  $\varepsilon_B = 1, h_1 = h - h_2, \varepsilon_2 = \varepsilon_{ж}$  (диэлектрическая проницаемость жидкости), преобразуем (10) к виду :

$$C = 0,088 \frac{b}{d} (h - h_2 + \varepsilon h_2) = 0,088 \frac{bh}{d} + 0,088 \frac{b}{d} (\varepsilon_{ж} h_2 - h_2) = C_B + \Delta C, \quad (4.11)$$

где  $C_B$  - начальная емкость датчика при отсутствии диэлектрика ;

$\Delta C = 0,088 b h_2 (\varepsilon_{ж} - 1) / d$  - абсолютное изменение емкости.

на рис.4.3.в показан второй тип датчика, в котором диэлектрическая проницаемость изменяется по высоте  $d$  параллельно плоскости пластин. Такой датчик может быть применен для измерения толщины материала из диэлектрика, например, толщины полиэтиленовой пленки. Датчик второго

типа можно рассматривать как плоско – параллельный конденсатор с двухслойным диэлектриком, емкость которого:

$$C = \frac{0,088S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}} = \frac{0,088S}{\frac{d_1 - d_2}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2}}, \quad (4.12)$$

где  $d$  – зазор;  $d_1, d_2$  – соответствующие толщины диэлектриков (воздуха, диэлектрика);  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - соответствующие диэлектрические проницаемости воздуха и диэлектрика.

Если принять  $\varepsilon = \varepsilon_B = 1, \varepsilon_2 = \varepsilon_g$  и разделить числитель и знаменатель (4.12) на  $d$ , то получим  $C = C_B + \Delta C$  или

$$\frac{\Delta C}{C_B} = \frac{\varepsilon_g - 1}{\varepsilon_g \left( \frac{d_1}{d_2} - 1 \right) + 1}. \quad (4.13)$$

Анализ формулы (4.13) показывает, что изменение емкости  $\frac{\Delta C}{C_B}$  будет линейным в том случае, если пространство между пластинами заполнено диэлектриком с весьма малой толщиной и  $\varepsilon_g = const$ .

Относительное изменение емкости колеблется в очень широких пределах  $\frac{\Delta C}{C} = 10^{-6} \div 10^{-1}$ . и зависит от чувствительности элемента, а также величины абсолютной емкости  $\Delta C$ .

Достоинством емкостных датчиков являются:

- а) высокая чувствительность и быстродействие, что позволяет измерять быстропеременные параметры (давление, вибрацию, ускорение и т.п. )
- б) малый вес и размеры;
- в) небольшое обратное воздействие на исследуемый параметр.

К недостаткам следует отнести:

- а) большое внутреннее сопротивление датчика;
- б) потребность в источнике напряжения повышенной частоты;
- в) необходимость тщательной тренировки датчика;
- г) влияние внешних факторов (влажность, температура ).

## 2. Описание лабораторной установки.

Лабораторная работа представляет собой установку, в состав которой входят:

- генератор переменного (синусоидального) напряжения;
- емкостной датчик с изменяющейся площадью обкладок;
- вольтметр переменного тока. (осциллограф)

Схема лабораторной установки представлена на рис.4.

Перед выполнением работы следует ознакомиться с внешним видом, схемой и органами управления лабораторной установки.

### **3. Порядок выполнения работы.**

#### 3.1. Требования безопасности.

Перед выполнением работы необходимо:

-пройти инструктаж по технике безопасности;

-расписаться в соответствующем журнале.

Запрещается включать установку и проводить экспериментальные работы без предварительной проверки лабораторной установки преподавателем или лаборантом.

#### 3.2. Экспериментальное определение градуировочной характеристики датчика.

Снять показания прибора (вольтметра переменного тока) и зависимости от угла поворота датчика и различных значений частоты.

Для этого необходимо:

а) включить лабораторную установку;

б) установить переключатель генератора последовательно в положение:

$f_1 = \quad$ ,  $f_2 = \quad$ ,  $f_3 = \quad$  ;

в) вращая ручку датчика по часовой стрелке от  $0^0$  до  $180^0$  снять показания вольтметра при различных значениях частоты. Полученные данные занести в табл. 4.1;

Таблица 4.1.

f Гц	Значение $U(\vartheta)$ при различных $\alpha^0$						
	0	20	40	60	90	150	180

г) по данным табл.4.1. построить в одном масштабе зависимости  $U_{пр} = f(\alpha)$  для трех значений частоты.

### **4. Оформление отчета.**

Отчет должен содержать:

а) цель работы;

б) описание принципа работы емкостного датчика;

в) принципиальную электрическую схему установки;

г) перечень оборудования и приборов;

д) табл.4.1 с экспериментальными данными и графическая зависимость  $U_{пр} = f(\alpha)$ , построенная по данным табл.4.1.

е) выводы по работе.

### Контрольные вопросы.

1. Принцип работы емкостного датчика.
2. Как влияет изменение площади (в зависимости от угла поворота) на характеристику датчика?
3. Достоинства и недостатки емкостных датчиков.
4. Влияние частоты питающего напряжения датчика на его характеристику

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.

**Цель работы:** Изучение характеристик и рассмотрение различных схем включения потенциометрических преобразователей.

### 1. Общие сведения.

Потенциометрический преобразователь представляет собой переменный резистор, у которого при перемещении подвижной системы меняются электрическое сопротивление между подвижным контактом (ползунком) и выводами резистивного элемента. (см. рис. 5.1)

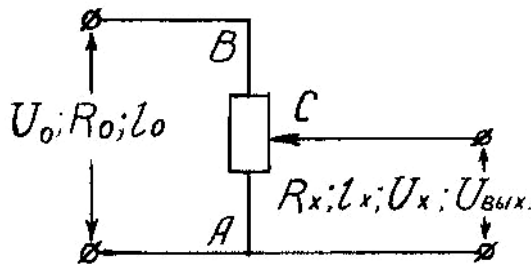


рис. 5.1. Схема включения потенциометра.

При данном способе включения выходное напряжение описывается следующим выражением

$$U_{\text{вых}} = U_x = U_0(R_x/R_0) \quad (5.1)$$

Если сопротивление потенциометра  $R$  меняется по линейному закону, то имеем

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{l_x}{l_0} \Rightarrow U_{\text{вых}} = U_0 \frac{l_x}{l_0}$$

Если  $R$  меняется по более сложному закону, то

$$R_x = R_0 f\left(\frac{l_x}{l_0}\right) \quad (5.2)$$

$$U_{\text{вых}} = U_0 f\left(\frac{l_x}{l_0}\right) \quad (5.3)$$

где  $f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)$  некоторая функция перемещения ползунка потенциометра.

Следовательно, с помощью потенциметрического преобразователя, сопротивление которого распределено по какому либо закону, можно преобразовать механическую величину в электрическую по требуемой функциональной зависимости (5.3).

Зависимость сопротивления от перемещения подвижной системы может быть линейной либо нелинейной. В качестве потенциметрических преобразователей могут использоваться переменные резисторы имеющие износоустойчивость порядка  $10^4$  циклов.

Переменные резисторы могут быть проволочными и непроволочными. Непроволочные подразделяются на композиционные, керметные, пластиковые, металлоокисные и металлизированные.

Композиционные резисторы могут быть пленочные и объёмные. Их резистивный элемент выполняется на основе проводящего компонента (графит, сажа).

Резистивный элемент керметных резисторов представляет собой композиционный слой из диэлектрика и металла.

Резистивный элемент пластиковых резисторов выполнен на основе проводящих пластмасс.

Металлоокисные и металлизированные резисторы имеют резистивный элемент в виде микрокомпозиционного слоя из окислов металлов или сплавов металлов.

В проволочных потенциметрических преобразователях в качестве резистивного элемента используется проволока с высоким удельным сопротивлением  $\rho$ .

Достоинства проволочных потенциметрических преобразователей:

- точность
- стабильность при воздействии внешних факторов
- малая величина ТКС
- большая мощность рассеяния  $P_p$
- устойчивость к электрическим перегрузкам
- незначительный уровень собственных шумов
- высокая износостойчивость (более  $10^4$  циклов)

## **2.Проволочные потенциометры.**

Проволочные потенциометры классифицируются:

- по назначению, для измерения или отработки механических перемещений.
- по конструкции, с одним или несколькими резистивными элементами и скользящими контактами. преобразователи с линейным или угловым перемещением подвижного контакта, однооборотные и многооборотные.

Параметры проволочных потенциометров:

- номинальное сопротивление и допуск на неё.
- допустимая мощность рассеяния
- допустимая температура нагрева
- функциональная характеристика
- сопротивление изоляции, электрическая прочность
- разрешающая способность, чувствительность
- контактные шумы
- ресурс работы, надежность, долговечность, стойкость к внешним воздействиям
- погрешность линейности.

Чувствительность – это изменение выходного сигнала при перемещении скользящего контакта

$$S = \frac{dU_{вых}}{d\left(\frac{l_x}{l_0}\right)} \quad (5.4)$$

Электрическая разрешающая способность – это изменение сигнала на выходе при перемещении скользящего контакта на один виток.



$$\delta_{э.р.} = \frac{R_в}{R_0} \cdot 100\% = \frac{100\%}{n} \quad (5.5)$$

где  $n$  – число витков проволоки

$R_в$  – сопротивление одного витка.

$R_0$  – полное сопротивление

Угловая разрешающая способность показывает, какая часть рабочего угла приходится на один виток обмотки

$$\gamma = \frac{\varphi}{n} \quad (5.6)$$

где  $\varphi$  – электрический угол поворота

Чем больше витков содержит резистивный элемент, тем выше разрешающая способность, меньше скачки напряжения и выше точность воспроизведения функциональной характеристики. см. рис. 5.3.

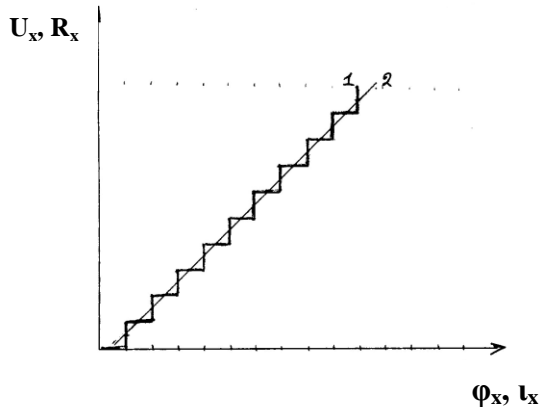


Рис. 5.2. Передаточная характеристика проволоочного потенциометрического преобразователя 1- реальная характеристика, 2 – идеальная характеристика

Контактные шумы, это напряжение помех, возникающее в динамическом режиме при скольжении подвижного контакта по резистивному элементу.

Контактные шумы зависят от:

- силы притяжения и твердости контактирующих поверхностей.
- скорости перемещения подвижной системы.
- стабильности линии контактирования
- степени износа и загрязнения контактной пары.

Материалы проволочных резисторов

Корпуса – пластмассы, алюминий и его сплавы

Регулировочные оси – стали, латуни.

Контактные пружины – бронза, нейзильбер.

Резистивный элемент – манганин, константан, нихром, благородные металлы.

### **3. Анализы работы потенциметрических преобразователей.**

#### **3.1 Работа в режиме холостого хода.**

$$U_{\text{вых}} = U_0 f\left(\frac{R_x}{R_0}\right) \text{ или } U_{\text{вых}} = U_0 f\left(\frac{l_x}{l_0}\right) \quad (5.7)$$

#### **3.2 Работа в наружном режиме.**

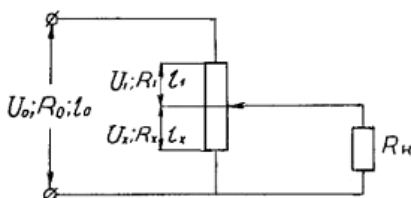


Рис. 5.3. Схема включения потенциметра в нагруженном режиме

$$\text{При } U_0 = \text{const} \quad U_x = U_0 \frac{R_x}{R_0} \quad (5.8)$$

$$R_l = \frac{R_l \cdot R_x}{R_l + R_x} \quad (5.9)$$

$$U_{\text{вых.}} = U_x \frac{R_n}{R_l + R_n} \quad (5.10)$$

Подставляя выражения (5.2), (5.3), (5.8), (5.9) в выражение (5.10) получим

$$U_{\text{вых.}} = U_0 \frac{f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)}{1 + kf\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right]} \quad (5.11)$$

где  $K = \frac{R_0}{R_H}$  - коэффициент нагрузки потенциометрического преобразователя.

Если  $K=0$  это режим холостого хода,

При  $K = \infty$ ,  $U_{\text{вых.}} = 0$  режим короткого замыкания.

Следовательно, чем меньше величина  $K$ , тем ближе кривая  $U_{\text{вых.}}$  к идеалу и меньше погрешность  $\Delta U_k$  (см. рис 5.3). Для получения линейной характеристики  $U_{\text{вых.}}$ , нужно чтобы  $0,01 \leq K \leq 0,05$ .

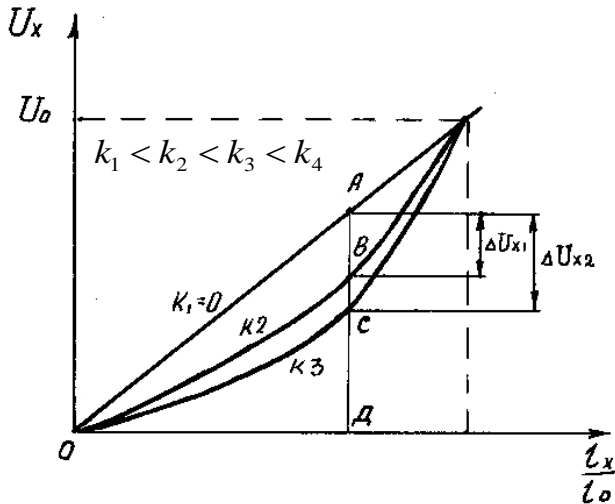


Рис. 5.4. Передаточная характеристика потенциометрического преобразователя при различных значениях коэффициента нагрузки.

### 3.3. Погрешности потенциометрических преобразователей.

1. Абсолютная погрешность.

$$\Delta U_x = \left| -U_0 \frac{kf^2 \left(\frac{l_x}{l_0}\right) \left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right]}{1 + kf \left(\frac{l_x}{l_0}\right) \left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right]} \right| \quad (5.12)$$

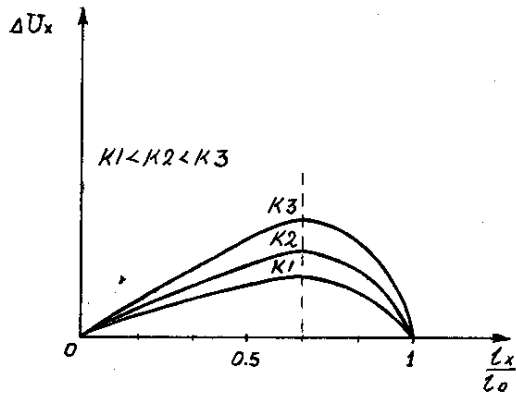


Рис. 5.5. Зависимость абсолютной погрешности от положения ползунка потенциметрического преобразователя при различных значениях коэффициента нагрузки.

2. Относительная погрешность.

$$\delta U_x = \frac{|\Delta U_x|}{U_x} \cdot 100\%$$

С учетом вышеприведенных выражений получим

$$\delta U_x = 1 + kf \left(\frac{l_x}{l_0}\right) \left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right] \cdot 100\% \quad (5.13)$$

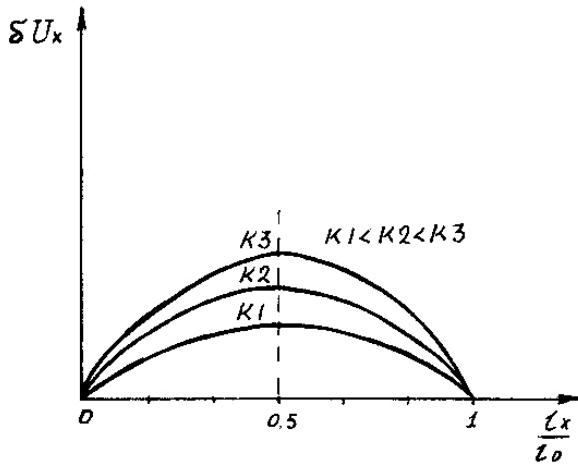


Рис. 5.6. Зависимость относительной погрешности от положения ползунка потенциметрического преобразователя при различных значениях коэффициента нагрузки.

3. Приведенная погрешность.

$$\delta U_{\text{прив}} = \frac{|\Delta U_x|}{U_{x_{\text{max}}}} \cdot 100\%$$

с учетом того, что  $U_{\text{max}} = U_0$  получим следующее выражение.

$$\delta U_{\text{прив}} = \left| - \frac{kf^2 \left(\frac{l_x}{l_0}\right) \left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right]}{1 + kf\left(\frac{l_x}{l_0}\right) \left[1 - f\left(\frac{l_x}{l_0}\right)\right]} \right| \cdot 100\% \quad (5.14)$$

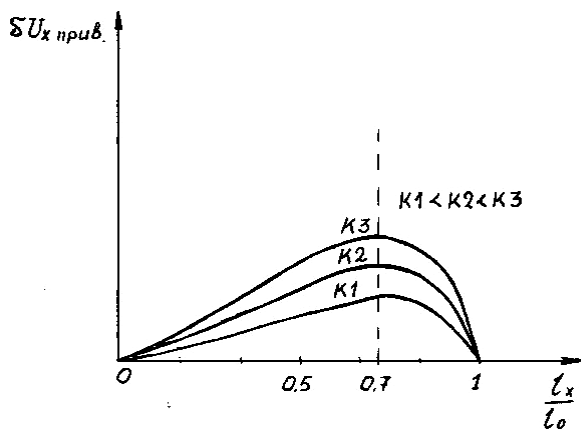


Рис. 5.7. Зависимость приведенной погрешности от положения ползунка потенциметрического преобразователя.

Из анализа работы потенциметрических преобразователей следует, что если требуются строго линейные характеристики, сопротивление нагрузки  $R_n$  выбирается в десятки раз больше, чем сопротивление потенциметрического преобразователя.

Приведенные выше потенциметрические преобразователи являются нереверсивными, так как при любом положении ползунка знак выходного напряжения или его фаза не меняются.

Различные варианты двухтактных (реверсивных) схем включения потенциметров представлены на рис. 5.8.

Возможность уравнивания схемы с помощью ползунка делает ненужным применение постоянных сопротивлений в дифференциальной схеме (рис. 5.8, а) и мостовой схеме с двумя потенциометрами (рис. 5.8, б). Возможность осуществления второго (постоянного) контакта с витками потенциметра приводит к предельно простой реверсивной схеме (рис. 5.8, в). Заметим, что в варианте с двумя потенциометрами лучшие результаты дает схема, изображенная на рис. 5.8, г с двумя дополнительными соединенными между собой постоянными контактами.

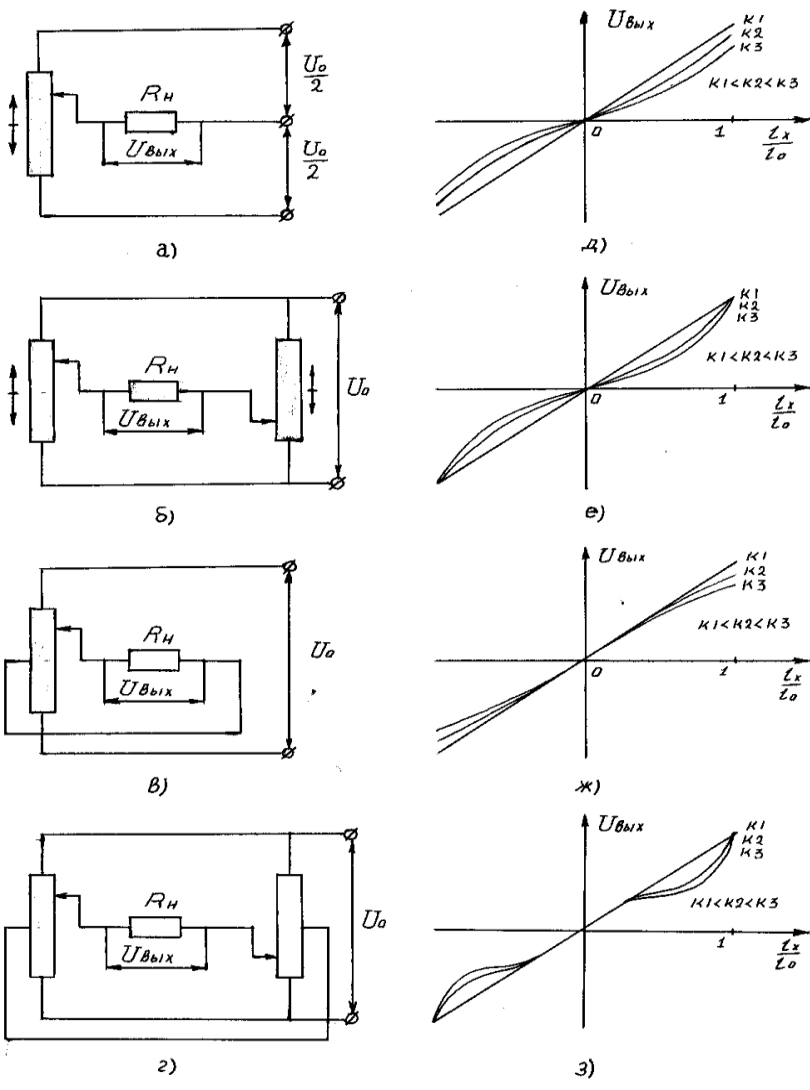


Рис. 5.8. Реверсивные схемы включения потенциометров и их передаточные характеристики: а, д – дифференциальная; б, е – мостовая с двумя потенциометрами; в, ж – простейшая; г, з – мостовая с двумя потенциометрами со средней точкой.

Это объясняется тем, что при нулевом положении ползунка выходные сопротивления этих схем равны нулю и поэтому для малых отклонений

ползунка они дают линейную статическую характеристику, мало зависящую от величины нагрузки. По той же причине эти схемы дают и более высокий КПД.

Основным недостатком потенциометрических датчиков является наличие скользящего контакта, снижающего надежность работы. Достоинства потенциометров заключаются в конструктивной простоте, небольших габаритах и весе, а так же в возможности питания как постоянным, так и переменным током.

#### **4. Расчет потенциометрических датчиков.**

При расчете потенциометрических датчиков применительно к условиям их работы в системах автоматического регулирования обычно требуется определить статическую характеристику и температуру обмотки.

Найдём уравнение статической характеристики  $U_{\text{вых}}=f(x_{\text{вх}})$  для схемы, приведенной на рис. 5.8, в, полагая, что потенциометр является линейным, т.е. все его витки имеют одинаковую длину.

Составим эквивалентную схему (рис. 5.9) и определим общее сопротивление цепи  $r_3$  относительно входных зажимов, обозначив полное сопротивление самого потенциометра  $r_0$  :

$$r_3 = \frac{r_0}{2} + \frac{R_n \cdot \frac{r_0 \cdot X_{\text{ex}}}{l}}{R_n + \frac{r_0 \cdot X_{\text{ex}}}{l}} + \left( \frac{r_0}{2} - \frac{r_0 X_{\text{ex}}}{l} \right) = \frac{r_0 (R_n \cdot l^2 + r_0 \cdot l \cdot X_{\text{ex}} - r_0 \cdot X_{\text{ex}}^2)}{l (R_n \cdot l + r_0 \cdot X_{\text{ex}})}$$

Отсюда общий ток цепи

$$J = \frac{U}{r_3} = \frac{U \cdot l (R_n \cdot l + r_0 \cdot X_{\text{ex}})}{r_0 (R_n \cdot l^2 + r_0 \cdot l \cdot X_{\text{ex}} - r_0 \cdot X_{\text{ex}}^2)} \quad (5.15)$$

а выходное напряжение в предположении, что источник, питающий цепь, обладает нулевым внутренним сопротивлением,

$$U_{\text{вых}} = J \frac{R_n \cdot \frac{r_0 \cdot X_{\text{ex}}}{l}}{R_n + \frac{r_0 \cdot X_{\text{ex}}}{l}} = \frac{U \cdot l \cdot R_n \cdot X_{\text{ex}}}{R_n \cdot l^2 + r_0 \cdot X_{\text{ex}} (l - X_{\text{ex}})} \quad (5.16)$$

Зависимость  $U_{\text{вых}}=f(X_{\text{вх}})$  изображена на рис. 5.10 (кривая 2).



При  $X_{\text{вх}}=X_{\text{вх max}}=\frac{l}{2}$

$$U_{\text{выхmax}} = \frac{U \cdot R_n}{2R_n + 0,5r_0} \quad (5.17)$$

Представив выражение (5.17) в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{U \cdot l \cdot X_{\text{вх}}}{l^2 + \frac{r_0 \cdot X_{\text{вх}}}{R_n} (l - X_{\text{вх}})}$$

заметим, что при соблюдении условия  $R_n \gg r_0$  второй член знаменателя будет значительно меньше первого и им можно пренебречь. В этом случае выражение (5.16) приводится к виду:

$$U^I_{\text{вых}} = \frac{U}{l} \cdot X_{\text{вх}} \quad (5.18)$$

и зависимость  $U^I_{\text{вых}}=f(X_{\text{вх}})$  есть прямая, проведенная из начала координат под углом  $\beta = \arctg \frac{U}{l}$  (кривая 1). Практически выражение (5.18) дает достаточно точные результаты уже при соотношении  $R_n > (8 \dots 10)r_0$

В некоторых случаях, когда вероятные отклонения ползунка в процессе работы системы автоматического регулирования достаточно велики, большую точность может дать линеаризация статистической характеристики методом секущей. Секущая 3 проводится из начала координат в точку  $A^1$  с координатами  $(X_{\text{вх max}} U^I_{\text{вых max}})$ , соответствующую наиболее вероятному максимальному отклонению ползунка. В этом случае

$$U_{\text{вых}}^I = \kappa^I X_{\text{вх}}; \quad \beta_2 = \arctg \kappa^I$$

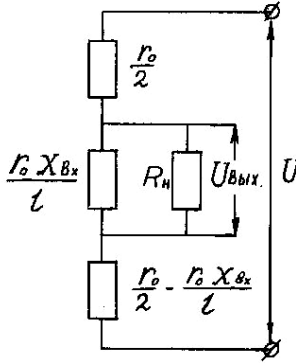


Рис 5.9. Эквивалентная схема потенциометра, включенного по схеме изображенной на рис. 5.8, в.

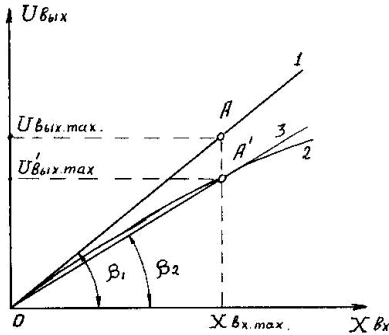


Рис. 5.10. Статистические характеристики линейного потенциометра включенного по схеме, показанной на рис. 5.8, в.

- 1 – нагруженный потенциометр; 2 – потенциометр с нагрузкой;
- 3 – линеаризованная характеристика нагруженного потенциометра.

$$\text{где } k^I = \frac{U_{\text{вых max}}^I}{X_{\text{вх max}}} \quad (5.19)$$

Предполагая, что ток нагрузки достаточно мал, а температурный коэффициент сопротивления провода незначителен, перегрев обмотки можно найти из уравнения теплового баланса

$$\frac{U^2}{r_0} = \varepsilon(T_k - T_0) = \eta \cdot S \cdot \theta \quad (5.20)$$

где  $S$  – площадь поверхности резистора;

$\eta$  - коэффициент теплоотдачи;

$(T_k - T_0) = \theta$  - перегрев обмотки;

$r_0$  – сопротивление обмотки;

$\varepsilon$  – коэффициент рассеяния.

При выборе допустимой температуры обмотки потенциометра этот вопрос необходимо рассмотреть с двух точек зрения: работы скользящего контакта и возникающих в обмотке механических напряжений.

Желательно, чтобы температура контактных поверхностей не превышала  $200^{\circ}\text{C}$ , так как при более высоких температурах для многих материалов начинается интенсивное окисление.

Надежное контактирование можно обеспечить только в результате правильного выбора натяжения проволоки в процессе намотки. Для этого, помимо конструктивных данных потенциометра, необходимо знать минимально и максимально возможную температуру его обмотки и каркаса.

Для определения конструктивных размеров потенциометра рекомендуется следующая последовательность расчета, которая будет дана для тороидальной конструкции каркаса (см. рис. 5.11), включенного по схеме, приведенной на рис. 5.8, в.

Будем полагать, что заданы:

максимальная величина входного перемещения в одну сторону  $\alpha_{\text{вх. max}}$  (рад), чувствительность  $K$ ; допустимый входной момент  $M_{\text{вх}}$ ; величина сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}}$ .

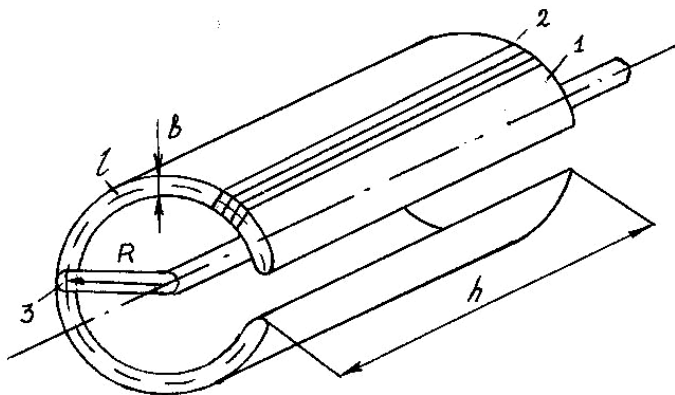


Рис. 5.11. Устройство потенциометра с тороидальным каркасом.

1 – каркас; 2 – обмотки; 3 – ползунок

Предположим, что условие  $R_H \gg r_0$  может быть выдержано. Требуемая величина питающего напряжения определяется из выражения:

$$\frac{U}{2} = K\alpha_{\text{ex max}}$$

или с учетом запаса по перемещению (порядка 1,3...1,8)

$$U = 3K\alpha_{\text{вх max}} \quad (5.21)$$

Далее, задавшись материалом обмотки и контактирующей части ползунка, из соотношения

$$M_{\text{вх}} = RF_n = RF\mu \quad (5.22)$$

можно выбрать радиус потенциометра  $R$  и величину контактного давления  $F$ .

Здесь  $\mu$  – коэффициент трения контактирующих поверхностей;  $F_n$  – усилие требуемое для перемещения ползунка.

Выбор радиуса потенциометра определяет и длину дуги каркаса (см. рис.5. 10).

$$l = 3\alpha_{\text{ex max}} \cdot R \quad (5.23)$$

Если далее задаться допустимым перегревом обмотки  $\theta$ , то высота каркаса  $h$  и его толщина  $b$  определяются выбором диаметра провода обмотки  $d$ .

Действительно, учитывая, что в первом приближении

$$S=2(h+b) \cdot l ,$$

а так же что

$$r_0 = n\rho \frac{2(h+b)}{q} = \frac{l\rho 2(h+b) \cdot 4}{d\pi d^2} = \frac{2,55 \cdot \rho(h+b) \cdot l}{d^3} \quad (5.24)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление;

$q$  – площадь поперечного сечения провода

На основании выражения (20) будем иметь.

$$\frac{d^3(3K\alpha_{\text{exmax}})^2}{2,55\rho(h+b) \cdot l} = \eta 2(h+b) \cdot 3\alpha_{\text{exmax}} \frac{M_{\text{ex}}}{F\mu} \cdot \theta$$

Отсюда

$$\frac{(h+b)^2}{d^3} = 0,6 \frac{K^2\alpha_{\text{exmax}} F\mu}{\eta\rho l M_{\text{ex}} \theta} = \frac{0,2K^2 F_n^2}{\eta\rho M_{\text{ex}}^2 \theta} \quad (5.25)$$

Уменьшение диаметра проволоки желательно как с точки зрения уменьшения размеров потенциометра, так с точки зрения уменьшения ступенчатости статической характеристики (для снижения шумов в системе автоматического регулирования). Однако при этом необходимо ориентироваться на механическую прочность проволоки и, в частности, проверить возникающие в ней напряжения температурного характера.

### **5. Описание лабораторной установки.**

Лабораторная работа представляет собой установку, в состав которой входят.

- два потенциометрических преобразователя ПП1, ПП2.
- Блок коммутации с возможностью изменения схем включения (переключатель П1) и изменения сопротивления нагрузки П2.
- Блок питания.

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 5.12.

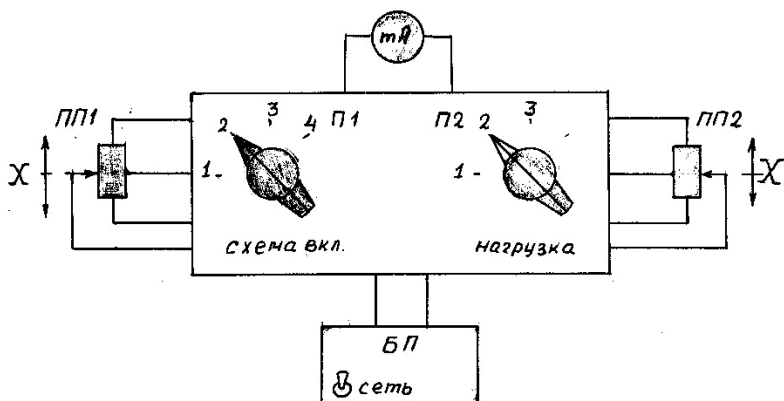


Рис. 5.12. Функциональная схема лабораторной установки.

Перед выполнением работы следует ознакомиться с внешним видом, схемой и органами управления лабораторной установки.

## **6. Порядок выполнения работы.**

### **6.1. Требование безопасности.**

Перед выполнением работы необходимо:

- пройти инструктаж по технике безопасности;
- расписаться в соответствующем журнале;

Запрещается включать установку и проводить экспериментальные работы без предварительной проверки лабораторной установки преподавателем или лаборантом.

### **6.2. Экспериментальная часть.**

1. Включить лабораторную установку в сеть.
2. Поставить тумблер «сеть» в положение «вкл.»
3. Выбрать схему измерения переключателем П1.
4. Подключить сопротивление нагрузки переключателем П2.
5. Меняя положение щёток потенциометрических преобразователей фиксировать изменение тока в нагрузке.

Положение переключателя П1 соответствует схемам включения изображенным на рис. 5.8, а-г.

## **7. Оформление отчета.**

Отчет должен содержать:

- а) цель работы;
- б) описание работы потенциометрического датчика;
- в) исследуемые схемы включения потенциометрических преобразователей и их статические характеристики;
- г) расчет погрешностей при различном значении сопротивления нагрузки;
- д) вывод по работе.

### **Контрольные вопросы.**

- 1) Классификация потенциометрических преобразователей.
- 2) Основные параметры и характеристики.
- 3) Схемы включения потенциометрических преобразователей.
- 4) Порядок расчета потенциометрических датчиков.
- 5) Погрешности возникающие при работе потенциометрических преобразователей.
- б) Достоинства и недостатки потенциометрических датчиков.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.**

Цель работы: Исследование основных характеристик и параметров фотоэлектрических преобразователей.

### **1. Общие сведения.**

Фотоэлектрические преобразователи предназначены для преобразования светового излучения в электрический сигнал.

Работа их основана на том, что при падении на поверхность некоторых тел световые лучи сообщают часть своей энергии электронам, переводя их с одних электронных уровней на другие, следствием чего является выход электронов на поверхность тела или переход их из состояния, связанного с атомами, в свободное состояние.

Явление выхода электронов на поверхность металлов под действием световых лучей называется фотоэлектронной эмиссией. Если сообщить эмитируемым электронам упорядоченное движение, поместив эмитирующую поверхность в электрическое поле, то получим электрический ток, называемый фототоком. Очевидно, фототок может возникать не только за счет эмитируемых на поверхность электронов, но также за счет электронов, выбитых квантами света из электронных орбит атома и остающихся свободными внутри вещества.

Известно три вида фотоэффекта: внешний, внутренний и в запирающем слое.

Внешний фотоэффект заключается в возникновении фотоэлектронной эмиссии на поверхности металлического электрода, освещаемого световыми лучами. Упорядоченное движение фотоэлектронам сообщается при помощи электрического поля, создаваемого между электродами. Поверхность одного из них является эмитирующей. Она покрывается металлом, обладающим повышенным фотоэффектом. К числу таких металлов относятся цезий, рубидий, торий, натрий и т.д. На рис. 6.1 показано принципиальное устройство фотоэлемента и его включение в измерительную схему. Тонкий эмитирующий слой 1 металла, например цезия, наносят на пленку 2 окисла этого металла, которая, в свою очередь покрывает серебряное зеркало 3, находящееся на внутренней поверхности стеклянного баллона 4. Световой луч 5 попадает на эмитирующую поверхность через окно в стеклянном баллоне. Положительный заряд батареи присоединяется к аноду 6, а отрицательный – к эмитирующему слою металла 1, являющемуся катодом.

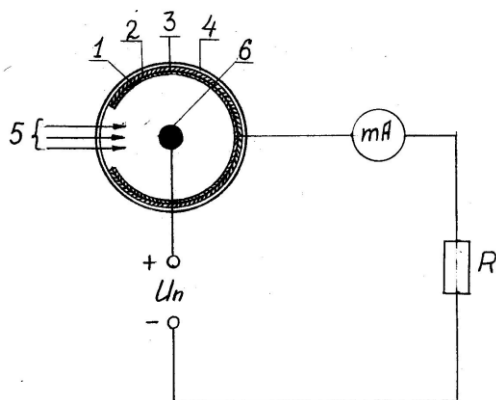


Рис. 6.1. Принципиальная схема фотоэлемента:  
1-эмитирующий слой металла (катод); 2-пленка окисла; 3-зеркало;  
4 – стеклянный баллон; 5 – световой луч; 6-анод.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом бывают вакуумные и газонаполненные. В первом случае фототок обусловлен только фотоэлектронами, тогда как во втором случае фотоэлектроны вызывают ионизацию газа (обычно аргон при давлении, равном сотым долям миллиметра ртутного столба), вследствие чего общий фототок возрастает (см. рис. 6.2а)

Столетов установил, что фотоэлектрический ток при постоянном спектральном составе пропорционален интенсивности света. Другими словами, если  $I_\phi$ -сила фототока, а  $\Phi$  - световой поток, падающий на



фотоэлемент, что при постоянном приложенном напряжении (см. рис. 6.1) получим:

$$I_{\phi} = k \cdot \Phi \quad (6.1)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий чувствительность фотоэлемента.

На рис. 6.2а показана зависимость силы фототока  $I_{\phi}$  от светового потока  $\Phi$  при различных значениях напряжения, подтверждающие установленную Столетовым зависимость (6.1).

Дальнейшие исследования показали большую зависимость фототока от спектрального состава света, причем было установлено, что световые лучи некоторых длин волн вовсе не вызывают фотоэффекта.

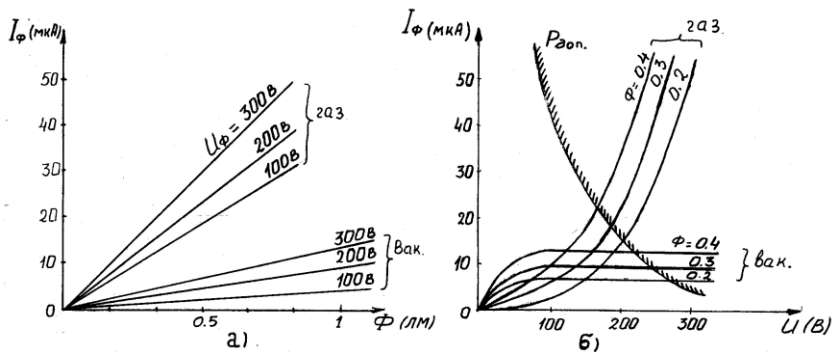


Рис. 6.2: а - световые характеристики фотоэлементов при различных значениях напряжения. б – вольтамперные характеристики фотоэлементов при различной величине светового потока.

Эйнштейн установил закон, по которому энергия фотоэлектронов пропорциональна частоте падающих лучей, т.е.

$$\frac{mv^2}{2} = h \cdot (\nu - \nu_0) \quad (6.2)$$

где  $m$  - масса электрона;

$\nu$  - скорость электрона;

$h$  - постоянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг.)

$\nu$  - частота падающих лучей;

$\nu_0$  - граничная частота лучей, при которой фотоэффект отсутствует.

Формулу (6.2) может записать следующим образом:

$$\frac{mv^2}{2} = h \cdot \nu - w_0 \quad (6.3)$$

где  $w_0$  - работа выхода электронов.

Если  $h \cdot \nu < w_0$  внешний фотоэффект невозможен.

$\nu_0 = \frac{w_0}{h}$  - граничная частота внешнего фотоэффекта.

Другой характеристикой важной при практическом использовании фотоэлементов является вольт-амперная характеристика (см.рис.6.2 б). Вольтамперная характеристика фотоэлементов – это зависимость величины фототока  $I_\phi$  от величины приложенного напряжения  $U_\phi$ .

Из рис. 6.2б видно, что при малых напряжениях чувствительность вакуумных фотоэлементов выше за счет отсутствия потерь на соударение с молекулами инертного газа. При увеличении напряжения  $U_\phi$  резко возрастает чувствительность газонаполненных фотоэлементов за счет появления дополнительных носителей от ударной ионизации. При больших напряжениях  $U_\phi$  вакуумные фотоэлементы не критичны к колебаниям питающего напряжения.

Чувствительность вакуумных фотоэлементов характеризуется удельной интегральной чувствительностью которая определяется отношением:

$$K = \frac{I_\phi}{\Phi \cdot U_\phi} \quad (6.4)$$

где  $I_\phi$  - величина фототока;

$U_\phi$  - величина приложения напряжения;

$\Phi$  - величина падающего светового потока.

Вакуумные двухэлектродные фотоэлементы являются практически безинертными приборами с весьма малым темновым током. Темновой ток вакуумного фотоэлемента составляет примерно одну тысячную долю от максимально допустимого выходного тока.

Основной недостаток вакуумных фотоэлементов – их низкая чувствительность с (единицы или десятки мкА/лм) при небольшом внутреннем сопротивлении. Допустимые выходные токи вакуумных фотоэлементов не превышают 10-20 мкА. Это требует применение чувствительных электронных усилителей.

В качестве примера рассмотрим схемы на рис. 6.3 а,б.

Схемы на рис. 6.3 представляют собой фотореле. В первой схеме при отсутствии засветки на сетке триода Л1 будет запирающий отрицательный потенциал. Ток анода Л1 стремится к нулю, реле отключено. При засветке, за счет появления тока через фотоэлемент, потенциал сетки становится более положительным. Триод открывается, и при достижении тока в цепи анода равного току срабатывания реле, последнее включается замыкая контакты К1.1. Смена мест включения фотоэлемента и  $R_c$  во второй схеме позволяет получить фотореле работающее на затемнение.

Внутренний фотоэффект заключается в изменении электрического сопротивления некоторых полупроводниковых материалов при облучении их световыми лучами. К таким материалам относятся селен, сера, сплав сульфида таллия с окисью таллия и сернистый свинец.

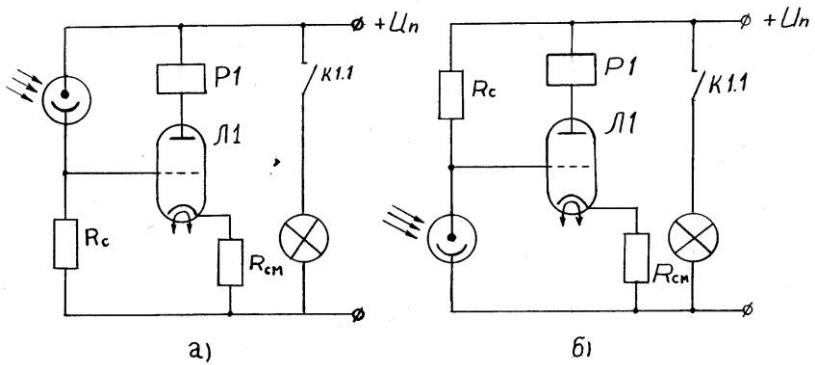


Рис. 6.3. а - схема включения фоторезистора при работе на засветку.  
б - схема включения фоторезистора при работе на затемнение.

При освещении полупроводниковых материалов энергия световых квантов затрачивается на освобождение связанных с атомами электронов и на перевод их в свободное состояние. Увеличение количества свободных электронов эквивалентно уменьшению электрического сопротивления полупроводников. Фоторезисторы с внутренним фотоэффектом получили название фоторезисторов.

Изменение сопротивления фоторезисторов пропорционально интенсивности падающего светового потока. Зависимость силы фототока от светового потока  $\Phi$ , называемая световой характеристикой фоторезистора, определяется выражением:

$$I_{\phi} = C \cdot L^{\gamma} \quad (6.5)$$

где  $C$  - постоянный коэффициент, зависящий от материала фоторезистора.

$L$  - освещенность.

$\gamma$  - коэффициент нелинейности.

Световая характеристика фоторезистора показана на рис. 4

Вольт-амперная характеристика фоторезистора это зависимость фототока от величины приложенного напряжения при постоянном значении светового потока.

В общем случае вольт-амперная характеристика нелинейна, но за счет того, что конструкция фоторезисторов обеспечивает хороший отвод тепла с

тонкого фоточувствительного слоя, рабочее тело не разогревается, а рабочая точка не выходит за пределы линейного участка. (см.рис. 6.5)

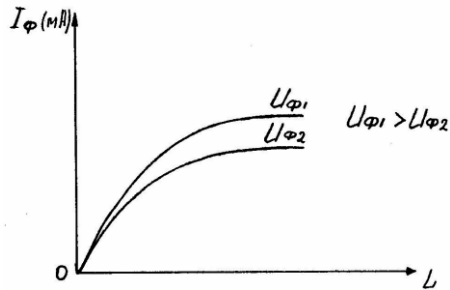


Рис. 6.4 Световая характеристика фоторезистора.

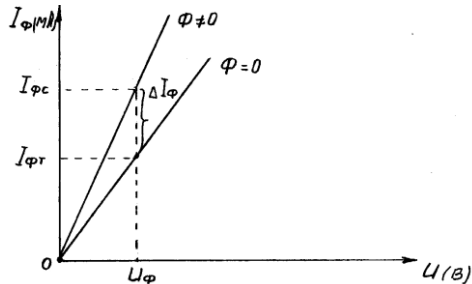


Рис.6.5 Вольт-амперная характеристика фоторезистора.

Чувствительность фоторезисторов выше, чем у фотоэлементов с внешним фотоэффектом и достигает нескольких миллиампер на люмен.

Удельная чувствительность фоторезисторов определяется выражением.

$$K = \frac{\Delta I_\phi}{\Delta \Phi \cdot U_\phi} \quad (6.6)$$

где  $\Delta I_\phi$  -изменение величины фототока.

$\Delta \Phi$  -изменение величины светового потока.

$U_\phi$  величина приложенного напряжения.

Одной из основных характеристик фоторезисторов является темновая кратность сопротивления, которая определяется выражением.

$$d = -\frac{R_{\phi m} - R_{\phi c}}{R_{\phi c}} \quad (6.7)$$

где  $R_{\phi m}$  - темновое сопротивление фоторезистора.

$R_{\phi c}$  - световое сопротивление фоторезистора.

Фоторезисторы, как и фотоэлементы с внешним фотоэффектом, имеют различные спектральные характеристики. Так, например селеновые фоторезисторы имеют максимум спектральной чувствительности в красной области спектра, таллофидные – в инфракрасной области и т.д.

Фоторезисторы обладают значительной инерцией вследствие влияния положительных ионов, возникающих при вторичной эмиссии. Они не стабильны во времени и подвержены влиянию температуры, потому не находят широкого применения в измерительной технике. Однако в качестве чувствительных элементов автоматических устройств они незаменимы.

Зависимость фототока от времени имеет следующий вид (рис. 6.6)

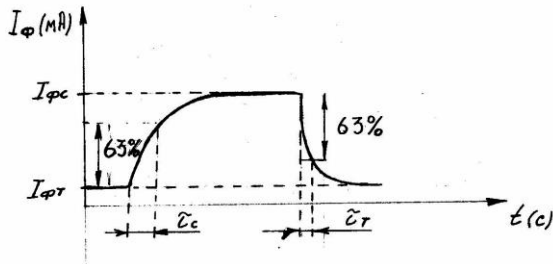


Рис. 6.6. Временная характеристика фоторезистора.

Из рис.6.6 видно, что для уменьшения инерционности фоторезистора выгоднее работать на затемнение, т.к.  $\tau_c > \tau_m$ .

Устройство фоторезистора показано на рис.6.7

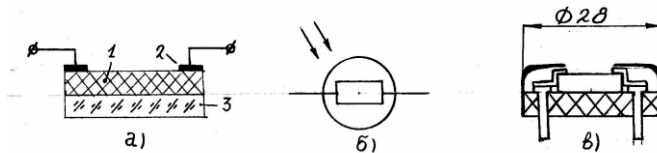


Рис.6.7 Фоторезистор

а)-устройство; б)-обозначение на схеме; в) – конструкция.

Схемы включения фоторезистора (см.рис. 6.8)

Первые две схемы представляют собой фотореле работающее на засветку. При нулевом световом потоке ток в цепи реле меньше тока срабатывания. При засветке сопротивление фоторезистора падает, ток в цепи реле растет до значения большего тока срабатывания.

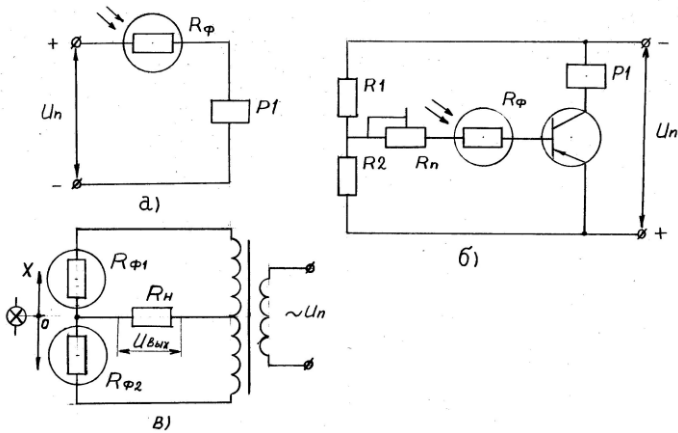


Рис. 6.8. Схемы включения фоторезистора.  
 а - простейшая схема фотореле;  
 б - фотореле с каскадом усиления;  
 в - дифференциальная схема включения.

Порог срабатывания в схеме рис.6.8а, регулируется подбором параметров фоторезистора и реле. В схеме рис.6.8б, кроме того, порог срабатывания можно изменять подбором параметров усилительного каскада. Схема изображенная на рис. 6.8в позволяет вырабатывать выходной сигнал пропорциональный величине перемещения источника излучения, а фаза направлению перемещения. При одинаковой освещенности нижнего и верхнего фоторезисторов схема находится в равновесии и выходное напряжение равно нулю, если источник света смещается возникает сигнал рассогласования.

Фотоэффект в запирающем слое рассмотрим на примере фотодиода.

Фотодиод представляет собой открытую для доступа света пластинку полупроводника, внутри которой имеются области электронной и дырочной проводимости, разделенные р-п переходом. Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами, к которым присоединены выводы, необходимые для подключения фотодиода в схему (рис.6.9а)

Затемненный фотодиод (световой поток  $\Phi=0$ ) не отличается от обычного полупроводниковго диода и его вольт-амперная характеристика описывается выражением.

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (6.8)$$

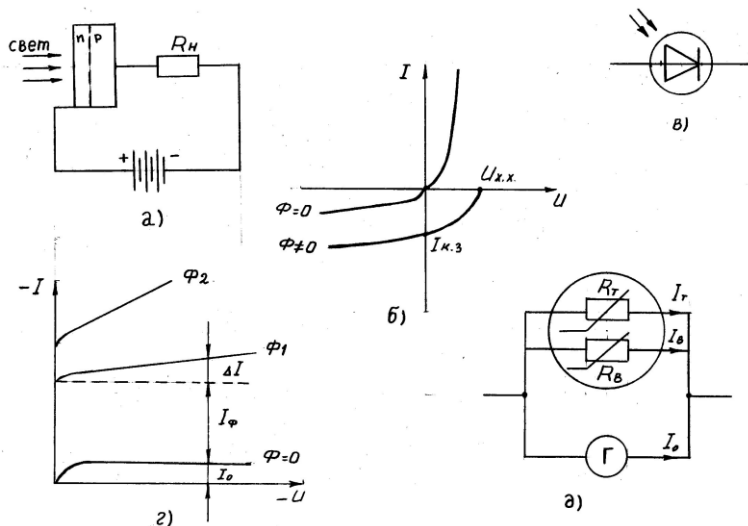


Рис.6.9 Фотодиод.

а-принципиальная схема; б,г-вольт-амперная характеристика; в-обозначение на схеме; д-схема замещения.

где  $I_0$  -ток насыщения  
 $q$  -заряд электрона;  
 $U$  -внешнее напряжение;  
 $T$  -температура;  
 $k$  -постоянная Больцмана.

Очевидно, что обратный ток затемненного фотодиода (его называют темновым током) является функцией температуры. Эта зависимость описывается выражением:

$$I = I_{01} \cdot e^{\left(\frac{B}{T_1} - \frac{B}{T}\right)} \quad (6.9)$$

Под действием света, падающего на поверхность полупроводника, в последнем образуются пары электрон – дырка. Не основные носители диффундируют в область р-п перехода, втягиваются его полем и выбрасываются в область, расположенную за переходом, образуя в ней заряд.

Вольт-амперная характеристика фотодиода может быть описана выражением.

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi \quad (6.10)$$

где  $I_\phi$  - фототок, то есть ток, созданный носителями, возбужденными светом:

$I$  - ток во внешней цепи.

Различают два режима работы фотодиода.

1. Режим класса А - вентильный режим (диод работает в режиме фотогенератора) это работы в четвертом квадранте (рис. 6.9б).

Когда ток во внешней цепи  $I=0$ , напряжение на освещенном фотодиоде  $U_{xx}$  (напряжение холостого хода) согласно уравнению (6.10) имеет величину

$$U_{xx} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_\phi}{I_0} + 1 \right) \quad (6.11)$$

Значение тока короткого замыкания можно найти, приняв в выражении (10)  $U=0$

$$I = -I_\phi \quad (6.12)$$

Фототок  $I_\phi$  связан линейной зависимостью с величиной светового потока  $\Phi$ :

$$I_\phi = K\Phi \quad (6.13)$$

где  $K$ -чувствительность фотодиода. ( $K=20-30$  мА/лм)

Для максимальной передачи мощности в нагрузку, сопротивление нагрузки определяется выражением

$$r_{ном} = 0,88 \frac{U_{x.x}}{I_{к.з.}} \quad (6.14)$$

2. Режим класса В (фотодиодный режим) – диод работает в третьем квадранте при обратном смещении.

При  $U<0$  и  $\Phi \neq 0$  экспоненциальный член в скобках (6.10) значительно меньше единицы, следовательно:

$$I = -I_0 - I_\phi \quad (6.15)$$

а вольт-амперная характеристика фотодиода, включенного в направлении запириания, сместится параллельно темновой вольт-амперной характеристике, как это показано на рис. 6.9б в третьем квадранте. Однако вольт-амперные характеристики реального фотодиода при увеличении светового потока не остаются параллельными друг другу; чем больше световой поток, тем больший угол образует вольт-амперная характеристика с осью напряжений (см.рис. 6.9г). Если измерить величину установившегося тока через освещенный фотодиод при некотором фиксированном напряжении на нем, то окажется, что приращение тока, вызванное действием света, превышает значение  $I_\phi$  на некоторую величину  $\Delta I$  с учетом выше сказанного вместо формулы (6.15) получим



$$I = -I_0 - I_{\phi} - \Delta I \quad (6.16)$$

Возникновение  $\Delta I$  обусловлено дополнительным разогревом фотодиода протекающим через него фототоком  $I_{\phi}$ . Это значит что схема замещения фотодиода должна представлять собой цепь из включенных параллельно генератора тока насыщения  $\Gamma$  и подогреваемого терморезистора  $R_t$ , роль подогревателя в котором играет нелинейное сопротивление (варистор  $R_v$ ), не зависящее от температуры, с вольт-амперной характеристикой, описываемой выражением (6.13). Такая схема замещения приведена на рис. 6.9д.

Основное применение фотодиоды нашли в качестве высокочувствительных датчиков светового потока. Их несомненным достоинством является высокая чувствительность, малая инерционности (менее одной микросекунды) и малые габариты. Недостатком фотодиодов является температурная чувствительность и нелинейность характеристик.

## **2. Описание лабораторной установки.**

Лабораторная работа представляет собой установку, в состав которой входят:

- источник света с регулируемой величиной освещенности. (рег. R1)
- три типа фотоэлементов (вакуумный фотоэлемент, фоторезистор, фотодиод)
- блок коммутации позволяющий подключать миллиамперметр, вольтметр и регулируемое напряжение питания к соответствующим фотоэлементам (перекл. П1)
- блок питания.

Функциональная схема лабораторной установки представлены на рис. 6.10.

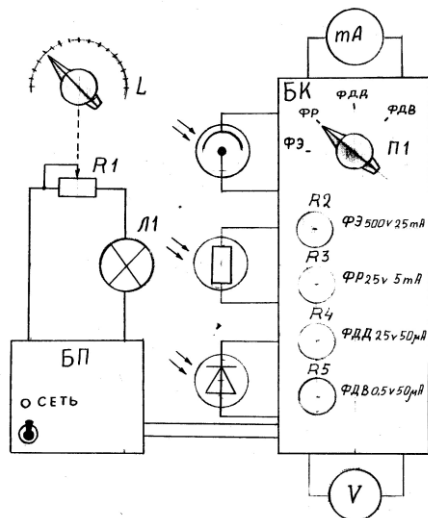


Рис. 6.10 Функциональная схема лабораторной установки.

Перед выполнением работы следует ознакомиться с внешним видом, описанием работы и органами управления лабораторной установки.

### 3. Задание.

1 Снять семейство вольт-амперных и световых характеристик фотоэлемента. Рассчитать удельную чувствительность в заданной рабочей точке.

2 Снять семейство вольт-амперных и световых характеристик фоторезисторов. Рассчитать удельную чувствительность и темновую кратность сопротивления.

3 Снять вольт-амперные характеристики фотодиода в вентильном и диодном режимах.

### 4. Порядок выполнения работы.

4.1. Требования безопасности.

- пройти инструктаж по технике безопасности;
- расписаться в соответствующем журнале.

4.2. Экспериментальная часть:

- включить лабораторную установку (перекл. сеть в положение вкл.);
- выбрать тип исследуемого элемента переключателем П1.
- для снятия вольт-амперных характеристик, задать значение освещенности L резистором R1. Меняя значения напряжения на

фотоэлементах резисторами R2-R4, снять показания миллиамперметра и вольтметра.

- для снятия световых характеристик, фиксируем величину приложенного напряжения ( $U_{фз}$ ,  $U_{фр}$ ,  $U_{фд}$ )
- меняя величину освещенности L снимаем показания миллиамперметра.
- для снятия вольт-амперной характеристики диода в вентиляльном режиме фиксируем величину освещенности L и меняя величину сопротивления нагрузки  $R_5$  снимаем показания миллиамперметра и вольтметра.

## 5. Оформление отчета.

Отчет должен содержать:

- а) цель работы.
- б) функциональную схему лабораторной установки.
- в) краткое описание каждого типа фотоэлемента.
- г) таблицы с экспериментальными данными и графическими зависимостями  $I_{\phi} = f(U_{\phi})$ ;  $I_{\phi} = f(L)$ ; для всех типов фотоэлементов.
- д) выводы по работе.

### Контрольные вопросы.

1. Внешний фотоэффект.
2. Внутренний фотоэффект.
3. Фотоэффект в запирающем слое.
4. Сравнительная характеристика фотоэлементов, фоторезисторов и фотодиодов.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА**

Цель работы: Изучение принципа действия и назначения датчиков Холла; определение статической характеристики. Работа выполняется в течение одного занятия. Перед выполнением работы необходимо по настоящим указаниям ознакомиться с физическими основами работы гальваномагнитных полупроводниковых приборов.

### 1. Общие сведения.

#### 1.1 Гальваномагнитные эффекты.

Под гальваномагнитным полупроводниковым прибором понимают устройство, в котором используется два гальваномагнитных эффекта - эффект Холла и эффект изменения сопротивления в магнитном поле. Сущность этих явлений можно уяснить с помощью рис.7.1, на котором изображена

прямоугольная полупроводниковая пластина, к узким боковым граням которой с помощью электродов подводится электрический ток  $J$ . Посередине широких боковых граней пластины друг против друга находятся еще два электрода. Вольтметр  $V_J$  подключен к контактам, подводящим ток, а вольтметр  $V_X$  - ко второй паре контактов, расположенных на широких гранях пластины. Поместим полупроводниковую пластину в воздушный зазор электромагнита. Если через обмотку электромагнита ток не течет, то вольтметр  $V_J$  покажет напряжение равное  $JR_0$ , где  $R_0$  - активное сопротивление пластины. Индекс 0 - означает, что сопротивление пластины измерено в отсутствии магнитного поля  $B_0 = 0$ . Другой прибор  $V_X$  не покажет напряжение; поскольку контакты, к которым он присоединен, находятся на линии равного потенциала. Если через обмотку электромагнита пропустить ток, то полупроводниковая пластина окажется в магнитном поле с индукцией  $B_0 \neq 0$ . Вектор  $\vec{B}_0$  при этом направлен перпендикулярно плоскости пластины. Тогда вольтметр  $V_J$  покажет высокое напряжение, т.е. сопротивление  $R_0$  увеличится на некоторую величину  $\Delta R$ ; прибор  $V_X$  отметит некоторое напряжение  $U_X$ . Исследование влияния напряженности и полярности магнитного поля на холловское напряжение и на изменение сопротивления показывает, что независимо от вида полупроводникового материала эти эффекты характеризуются следующими свойствами:

а) Напряжение Холла  $U_X$  меняет знак при изменении полярности магнитного поля. При этом одинаковым (по абсолютной величине) значениям индукции соответствуют примерно одинаковые абсолютные значения напряжения Холла. В первом приближении напряжение Холла, пропорционально величине  $B$  и выражается следующей формулой:

$$U_X = \left( \frac{R_X}{d} \right) JB \quad (7.1)$$

где  $d$  - толщина пластины в направлении вектора магнитной индукции;  $R_X$  - постоянная Холла, величина характерная для каждого полупроводникового материала и зависящая, вообще говоря, от  $B$ .

б) Величина,  $\Delta R$  - на которую увеличивается сопротивление пластины при включении магнитного поля, не зависит от направления тока в обмотке электромагнита. Для сопротивления  $R(B)$  в магнитном поле с индукцией  $B$  существует приближенная зависимость:

$$R(B) = R_0 [1 + f(|B|)] \quad (7.2)$$

В малых магнитных полях функция,  $f(|B|)$  зависящая только от абсолютной величины  $B$ , пропорциональна  $B^2$ . Таким образом, гальваномагнитными называют такие преобразователи, принцип действия которых основан на использовании физических явлений, возникающих при воздействии магнитного поля на движущийся заряд.

В настоящее время известно четыре гальваномагнитных эффекта - два поперечных и два продольных. Поперечный эффект Холла состоит в возникновении поперечной разности потенциалов (э.д.с. Холла), пропорциональной магнитной индукции и току, протекающему по проводнику. Эффект Эттингаузена - в появлении поперечной разности температур. Эффект изменения сопротивления в магнитном поле - в изменении продольного сопротивления проводника и эффект Нериста - в появлении продольной разности температур.

Из указанных эффектов в технике широкое применение нашли только Холла и эффект Гаусса (магнитосопротивления).

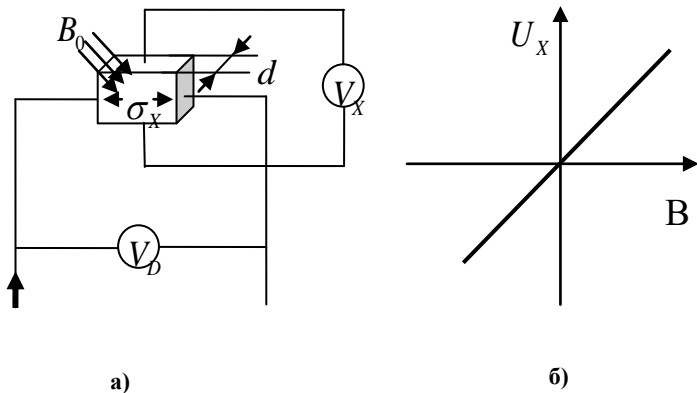


Рис. 7.1.

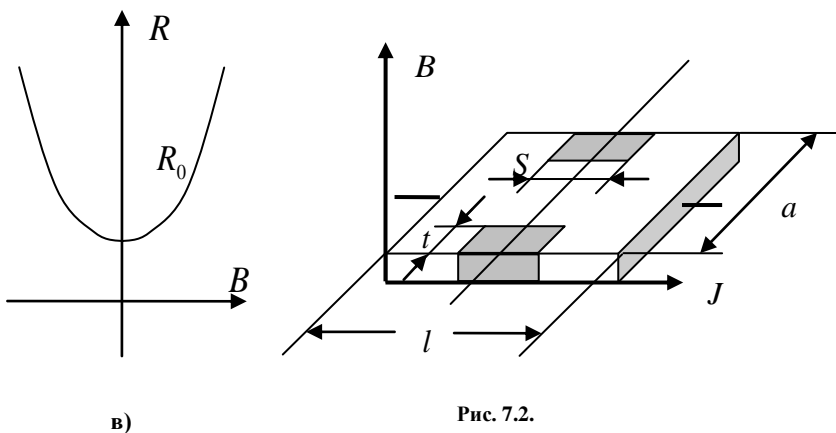
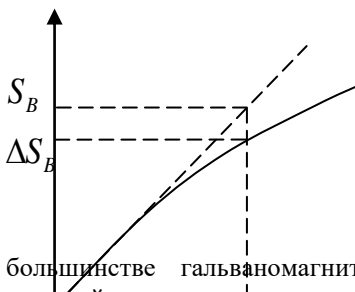


Рис. 7.2.



Как правило, в большинстве гальваномагнитных преобразователей одновременно в той или иной мере возникают несколько или все четыре гальваномагнитных эффекта. Вместе с тем специфические особенности преобразователей, способствующие наиболее яркому проявлению того или иного эффекта, позволяют разделить их на преобразователи Холла, и преобразователи, основанные на изменении внутреннего сопротивления.

## 1.2. Датчики Холла.

К преобразователям Холла обычно относят те гальваномагнитные преобразователи, выходная величина которых прямо пропорциональна холловской э.д.с, возникающей внутри него.

Обычно преобразователь Холла представляет собой проводящую пластину определенной конфигурации, выполненную из проводника или полупроводника и снабженную несколькими электродами, предназначенными для соединения преобразователя с источником питания (токовые электроды) и устройством, измеряющим значение э.д.с. Холла (холловские электроды). Конструктивное исполнение и геометрические размеры, как проводящей пластины, так и электродов могут быть весьма разнообразны.

Чаще всего с целью равномерного распределения тока токовые электроды наносятся по всей ширине соответствующей грани активной пластины преобразователя (рис.7.1).

Остановимся более подробно на эффекте Холла. Если по бесконечно длинной пластине, выполненной из проводящего материала и помещенной в магнитное поле, пропущен ток  $J$ , то на каждый электрон, движущийся внутри пластины, действует магнитная часть силы Лоренца  $\vec{F}_1$  пропорциональная заряду электрона и векторному произведению его скорости на магнитную индукцию  $\vec{B}_0$ .

$$\vec{F}_1 = e_0 [\vec{v} \vec{B}_0] \quad (7.3)$$

Под действием силы Лоренца  $\vec{F}_1$  электроны отклоняются к одному краю пластины, создавая там избыток отрицательных зарядов. Последнее обстоятельство приводит к появлению разности потенциалов  $\mathcal{E}_X$ , следовательно, поперечной составляющей напряженности электрического поля  $\vec{E}_X$ . С появлением этой составляющей на электрон, кроме лоренцевой силы  $\vec{F}_1$ , начинает действовать также сила  $\vec{F}_2$ :

$$\vec{F}_2 = e_0 \vec{E}_X \quad (7.4)$$

В установившемся состоянии обе силы  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  равны по абсолютному значению и противоположны по направлению. Таким образом, приравняв правые части уравнений (7.3) и (7.4) и переходя к скалярной форме записи, получим выражение для напряженности электрического поля Холла:

$$E_X = v B_0 \quad (7.5)$$

На практике удобнее пользоваться выражением для э.д.с. Холла через ток  $J$  и геометрические размеры пластины. Поскольку напряженность электрического поля  $E_X = \frac{\varepsilon_X}{a}$ , а ток  $J = ne_0 Vad$ , где  $a$  - ширина пластины,  $d$  - ее толщина,  $n_0$  - концентрация носителей заряда, то с учетом этих соотношений эту формулу можно записать:

$$\varepsilon_X = \frac{R_X J \mathbf{B}_0}{d} \quad (7.6)$$

где  $R_X = \frac{1}{e_0 n}$  коэффициент, зависящий только от природы вещества, из которого изготовлена пластина, и называемый коэффициентом или постоянной Холла.

Выражение (7.6), полученное на основании элементарных представлений электронной теории, строго говоря, справедливо только в случае идеальных проводников, когда скорость всех электронов можно считать одинаковой. В реальных веществах благодаря тепловому движению в токе участвуют электроны с самыми разнообразными скоростями. В этом случае постоянная Холла будет зависеть от того, какова при данной скорости продолжительность между двумя столкновениями, или какова при этом длина свободного пробега электрона, что в свою очередь, зависит от типа кристаллической решетки. Влияние типа решетки учитывается с помощью коэффициента  $A$ , т.е.  $R_X = \frac{A}{e_0 n}$ . При изготовлении гальваномагнитных преобразователей наиболее часто используются полупроводники, имеющие атомную решетку, для которой:

$$R_X = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{e_0 n} = 1,17 \frac{1}{e_0 n} \quad (7.7)$$

Далее, выражение (7.6) получено в предположении, что в переносе тока участвуют заряды одного знака: дырки или электроны. Вместе с тем имеются полупроводники, в проводимости которых участвуют как дырки, концентрацию которых обозначим через  $P$ , а подвижность через  $U_p$ , так и электроны с концентрацией  $n$  подвижностью  $U_n$ . Для таких полупроводников значение постоянной Холла может быть определено по формуле:

$$R_X = \frac{pU_p^2 - nU_n^2}{(pU_p + nU_n)^2} \cdot \frac{A}{e_0} \quad (7.8)$$

Если проводящая пластина питается не от источника тока, а от источника напряжения, то, выражая ток  $J$  в формуле (7.6) через приложенное



напряжение  $U$  и проводимость  $g = \frac{\sigma S}{l}$  (где  $\sigma = e_0 n \mu$  удельная проводимость,  $\mu$  - подвижность носителей,  $S = ad$  - площадь сечения,  $a$  и  $b$  - ширина и длина пластины), и производя преобразования, получим:

$$\varepsilon_X = \frac{a}{l} \mu U B_0 \quad (7.9)$$

Как видно из последнего выражения, в этом случае э.д.с. Холла, пропорциональна подвижности носителей заряда, а не постоянной Холла.

Размеры активной пластины преобразователя и их соотношение оказывают весьма существенное влияние на ряд параметров преобразователей: чувствительность, вид градуировочной характеристики, допустимую рассеиваемую мощность и т.д. В прямоугольном, симметричном преобразователе Холла, имеющем конечные размеры активной пластины и электродов, значение э.д.с. Холла может заметно отличаться от значения, определяемого с помощью выражений (7.6) и (7.9) полученных для бесконечно длинной пластины, что объясняется закорачивающим действием токовых и холловских электродов, причем наибольшее влияние оказывают токовые электроды, охватывающие значительную часть поверхности преобразователя.

Как показано в ряде работ значение э.д.с. Холла преобразователя со сплошными токовыми электродами может быть определено как произведение э.д.с. Холла бесконечно длинного преобразователя  $\varepsilon_{X\infty}$  на некоторую функцию  $\varphi$  его геометрических размеров, зависящую от значения магнитной индукции, как параметра:

$$\varepsilon_X = \varepsilon_{X\infty} \varphi \left( \frac{l}{a}, \frac{s}{l}, t, Y \right) \quad (7.10)$$

где  $\varepsilon_{X\infty} = \frac{R_X}{d} J B_0$  при питании от источника тока или  $\varepsilon_{X\infty} = \frac{d}{l} \mu U B_0$  при питании от источника напряжения;  $Y = 2\pi \arctg(UB_0)$ ;  $l, a, s, t$  - геометрические размеры активной пластины преобразователя и его электродов (рис.7.2). Зависимость  $\varphi$  от произведения  $UB_0$  объясняется эффектом магнитосопротивления, который вызывает увеличение омического сопротивления пластины в магнитном поле, что эквивалентно увеличению отношения  $\frac{l}{a}$  и уменьшению  $\frac{s}{l}$ . Таким образом, в режиме заданного тока:

$$\varepsilon_X = \frac{R_X}{d} J B_0 \varphi \left( \frac{l}{a}, \frac{s}{l}, t, Y \right) \quad (7.11)$$

а в режиме заданного напряжения

$$\varepsilon_x = \frac{d}{l} \mu U B_0 \varphi \left( \frac{l}{a}, \frac{s}{l}, t, Y \right) \quad (7.12)$$

Выбором оптимальных геометрических размеров и подбором материала активной пластины можно получить преобразователи Холла, обладающие высокой линейностью градуировочной характеристики и большой чувствительностью.

Одним из основных параметров преобразователя Холла является его чувствительность к магнитной индукции  $S_B$ , под которой понимают значение производной  $\frac{\partial \varepsilon_x}{\partial B}$  при заданном значении тока питания или напряжения приложенного к токовым электродам. Чувствительность преобразователя Холла к магнитной индукции в режиме заданного тока:

$$S_{BJ} = \frac{S_B}{J} = \frac{R_X}{d} \varphi \left( \frac{l}{a}, Y \right) \quad (7.13)$$

в режиме заданного напряжения

$$S_{BU} = \frac{S_B}{U} = \frac{d}{l} \mu \varphi \left( \frac{l}{a}, Y \right) \quad (7.14)$$

Допустимый ток питания преобразователя Холла и допустимое напряжение могут быть рассчитаны по формулам (1).

$$J_{\partial on} = \sqrt{2\nu \Delta T_{\partial on} d \sigma(B_{\max})} \quad (7.15)$$

$$U_{\partial on} = J^2_{\partial on} r_T(B_{\max}) \quad (7.16)$$

где  $\sigma(B_{\max})$  и  $r_T(B_{\max})$  - значения удельной проводимости и сопротивления между токовыми электродами преобразователя Холла, соответствующее тому максимальному значению магнитной индукции, для измерения которого предполагается использовать данный датчик.

$\nu$  - коэффициент теплоотдачи;

$\Delta T_{\partial on}$  - допустимая температура перегрева датчика.

Следует заметить, что вычисления  $J_{\partial on}$  и  $U_{\partial on}$  по приведенным выше формулам, как правило, связано со значительными трудностями в виду большого числа плохо учитываемых факторов, влияющих на коэффициент теплоотдачи  $\nu$ . Поэтому  $J_{\partial on}$  и  $U_{\partial on}$  чаще определяют экспериментально (при заданной температуре окружающей среды и значении  $B_{\max}$ ) путем построения характеристики:  $S_B = f(J)$ .

Как видно из графика (рис.7.3), начиная с некоторого тока питания, зависимость  $S_B = f(J)$  становится нелинейной, что объясняется нагревом пластин преобразователя и уменьшением значения постоянной Холла. Так как относительное изменение чувствительности  $S_B$  в данном случае равно относительному изменению постоянной Холла

$$\frac{\Delta S}{S_B} = \frac{\Delta R_X}{R_X} = \sigma_X \Delta T \quad (7.17)$$

(где  $\sigma_X$  - температурный коэффициент Холла), то, приняв  $\Delta T = \Delta T_{\text{дон}}$ , и зная  $\sigma_X$ , можно вычислить допустимое значение  $\Delta S_{B_{\text{дон}}} = S_B \sigma_X \Delta T_{\text{дон}}$ , а затем с помощью графика определить  $J_{\text{дон}}$ .

Известно, что порог чувствительности любого магнитометрического преобразователя связан с непостоянством начального (нулевого) уровня его выходного сигнала. Для датчиков Холла это напряжение, возникающее между холловскими электродами при отсутствии измеряемой индукции.

В общем случае в нулевой сигнал преобразователя Холла входят

$$U_0 = U_{HЭ} + U_{TЭ} + U_{\varphi} + U_{KB} + U_{Ш} \quad (7.18)$$

где  $U_{HЭ}$  - напряжение неэквипотенциальности;

$U_{TЭ}$  - напряжение термо-э.д.с;

$U_{\varphi}$  - напряжение, обусловленное выпрямляющим действием электродов;

$U_{KB}$  - квадратичная составляющая;

$U_{Ш}$  - напряжение шумов.

В зависимости от характера измеряемой величины и конструкции измерительного прибора влияние тех или иных составляющих нулевого сигнала на порог чувствительности преобразователя проявляется наиболее сильно, а влияние других можно пренебречь. Например, при измерении магнитной индукции постоянных полей и питании преобразователя постоянным током регистрирующая часть прибора реагирует на  $U_{HЭ}$  и  $U_{TЭ}$ , и оказывается нечувствительным к напряжению шумов;  $U_{\varphi}$  и  $U_{KB}$  в этом случае вообще не возникают. Рассмотрим каждую составляющую  $U_0$  в отдельности:

а.) Напряжение неэквипотенциальности является следствием асимметрии датчика Холла и определяется рядом причин: несимметричным расположением холловских электродов, неравномерной толщиной пластины

и ее неоднородностью. Принципиально может быть скомпенсировано схемотехническими решениями до сколько угодно низкого уровня.

б.) Напряжение термо-э.д.с. зависит от типа полупроводника, концентрации носителей заряда и температуры. Что также может быть схемотехнически скомпенсировано до сколько угодно низкого уровня.

в.) Составляющая  $U_{\phi}$  возникает в результате выпрямляющего действия электродов, вблизи которых при пайке образуются  $p-n$  переходы,  $U_{\phi}$  можно уменьшить совершенствованием технологии производства гальваномагнитных приборов.

г.) Квадратичная составляющая  $U_{KB}$  возникает только при питании датчика переменным током за счет поля рассеяния токоподводящих проводов. Она может быть отфильтрована с помощью избирательного усилителя, т.к. имеет удвоенную частоту по сравнению с питающим током.

д.) Напряжение шумов  $U_{III}$  имеет ту же природу, что и в любом полупроводниковом приборе и существенно зависит от чистоты используемых материалов и технологии изготовления.

Материалом для изготовления современных датчиков Холла, которые изготавливают с помощью плёночных технологий, являются арсенид индия ( $Jn As$ ) и антимонид индия ( $Jn Sb$ ). Датчик Холла из арсенида индия, например, при магнитной индукции  $B = 1 Tл$  и токе питания  $J = 0,1 A$  имеет выходное напряжение  $0,5B$  и  $U_{III} \approx 10^{-9} B$ .

Широкое распространение датчики Холла получили в устройствах автоматики, неконтактных коммутаторах, датчиках положения, измерителях проходящей мощности СВЧ излучения, модуляторах, головках считывания информации с магнитной ленты и магнитных дисков и т.п.

## **2. Описание лабораторной, работы.**

В лабораторную установку входят:

- датчик Холла;
- регулируемый источник тока питания датчика Холла;
- вольтметр электронный для измерения э.д.с. Холла;
- регулируемый источник магнитной индукции;

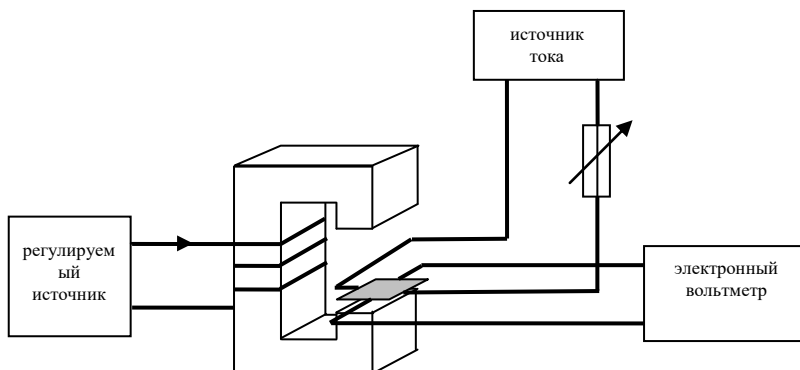


Рис. 7.4

Схема лабораторной установки приведена на рис.7.4

### 3. Порядок, выполнения работы.

#### 3.1. Требование безопасности.

Перед выполнением работ необходимо:

- пройти инструктаж по технике безопасности;
- расписаться в соответствующем журнале;
- перед включением установки все регулирующие органы установить в положение "0".

#### 3.2. Подготовка рабочего места.

- тумблером "Вкл" включить установку, дать прогреться в течение 10-15 минут.

#### 3.3. Построение градуировочных характеристик.

- изменяя индукцию в зазоре электромагнита построить градуировочные характеристики для различных значений тока питания датчика Холла. Полученные результаты занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1.

$B_1,$ mT	$J,$ mA	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		$U_x,$ В										
$B_2,$ mT	$U_x,$ В											
$B_3,$ mT	$U_x,$ В											

- по данным табл.7.1 построить в одном масштабе зависимости  $U_X = f(J)$  при различных значениях В, заданных преподавателем.
  - определить чувствительность  $S_B$  датчика Холла.
- 3.4. Оформление отчета.
- Отчет должен содержать:
- цель работы;
  - краткое описание принципа работы датчика Холла;
  - принципиальную схему и перечень оборудования и приборов;
  - таблицу 7.1 с экспериментальными данными;
  - выводы.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое гальваномагнитные эффекты?
2. Объясните сущность эффекта Холла?
3. Конструктивные особенности датчика Холла?
4. От чего зависит чувствительность датчика Холла?
5. Что такое напряжение неэквипотенциальности?