

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов специальности 6-05-0716-03  
«Информационно-измерительные приборы и системы»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 681.5  
ББК 32.965  
Ц75

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «26» февраля 2026 г.,  
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. В. Ф. Поздняков;  
ст. преподаватель Е. В. Позднякова

Рецензент канд. техн. наук Н. В. Герасименко

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для  
студентов специальности 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные при-  
боры и системы» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

## КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2026

## Содержание

1 Практическое занятие № 1. Расчет шунтов и добавочных резисторов, делителей напряжения.....	4
2 Практическое занятие № 2. Расчет резистивного преобразователя.....	5
3 Практическая работа № 3. Расчет емкостных преобразователей.....	9
4 Практическое занятие № 4. Расчет измерительных мостов постоянного и переменного тока.....	13
5 Практическое занятие № 5. Расчет оптических схем бесконтактных преобразователей.....	17
6 Практическое занятие № 6. Расчет оптических схем бесконтактных преобразователей.....	23
7 Практическое занятие № 7. Энергетический расчет оптического тракта.....	27
8 Практическое занятие № 8. Расчет преобразователей температуры....	30
Список литературы.....	36

## 1 Практическое занятие № 1. Расчет шунтов и добавочных резисторов, делителей напряжения

Обычно электроизмерительные приборы рассчитаны на измерение определенных электрических величин в заданном диапазоне. Для расширения диапазона измерения приборов используют масштабные преобразователи: пассивные, работающие за счет энергии объекта исследования, и активные, работающие за счет дополнительного источника питания.

К пассивным относятся шунты, добавочные сопротивления, делители напряжения, измерительные трансформаторы тока и напряжения.

К активным относятся измерительные усилители.

Если измеряемый ток  $I$  превышает по значению ток отклонения  $I_n$  подвижной части, то параллельно цепи измерительного механизма подключается шунт, через который пропускается ток  $I_{ш} = I - I_n$  (рисунок 1.1).

Если рассмотреть шунт как делитель тока с коэффициентом деления  $n = I/I_n$ , то его сопротивление

$$R_{ш} = R_n / (n - 1). \quad (1.1)$$

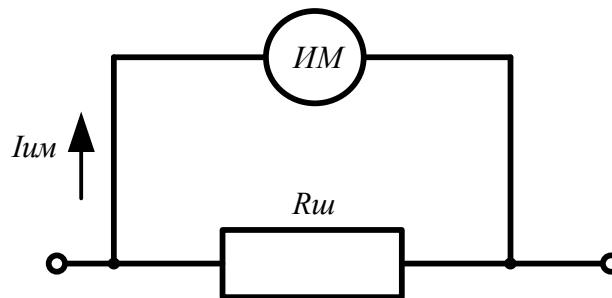


Рисунок 1.1 – Схема включения шунта

Для расширения пределов измерения вольтметров используют добавочные сопротивления (рисунок 1.2).

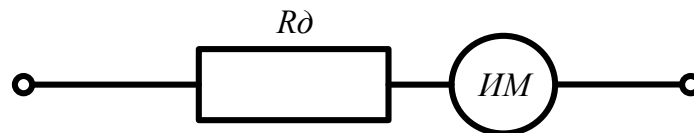


Рисунок 1.2 – Схема включения добавочного сопротивления

Для изменения пределов измерения напряжения  $U_V$  до  $U$  последовательно с вольтметром включают добавочный резистор, сопротивление  $R_d$  которого при заданном значении  $I_V$  определяется выражением

$$\frac{U_V}{R_V} = \left( \frac{U}{R_V + R_d} \right) = I_V = \text{const}; \quad U = U_V + U_d; \quad (1.2)$$

$$R_d = R_V (n - 1), \quad (1.3)$$

где  $n$  – коэффициент расширения предела измерения вольтметра,  $n = U/U_V$ .

Для этих же целей можно использовать и резистивный делитель (рисунок 1.3).

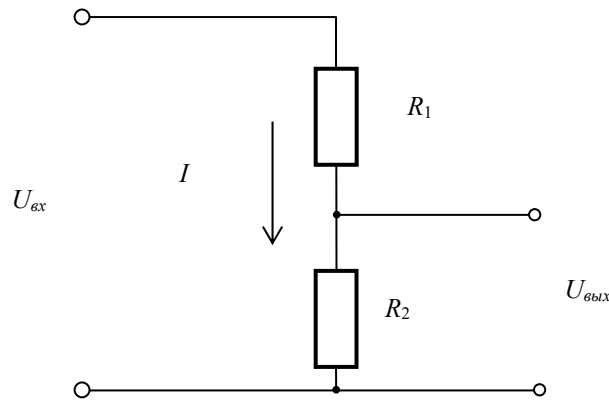


Рисунок 1.3 – Схема резистивного делителя

Обычно при расчете делителя задаются максимальной мощностью делителя или током, протекающим через делитель. Тогда

$$\begin{cases} R_1 + R_2 = \frac{U_{вх}}{I} \\ R_2 = \frac{U_{вых}}{I} \end{cases} . \quad (1.4)$$

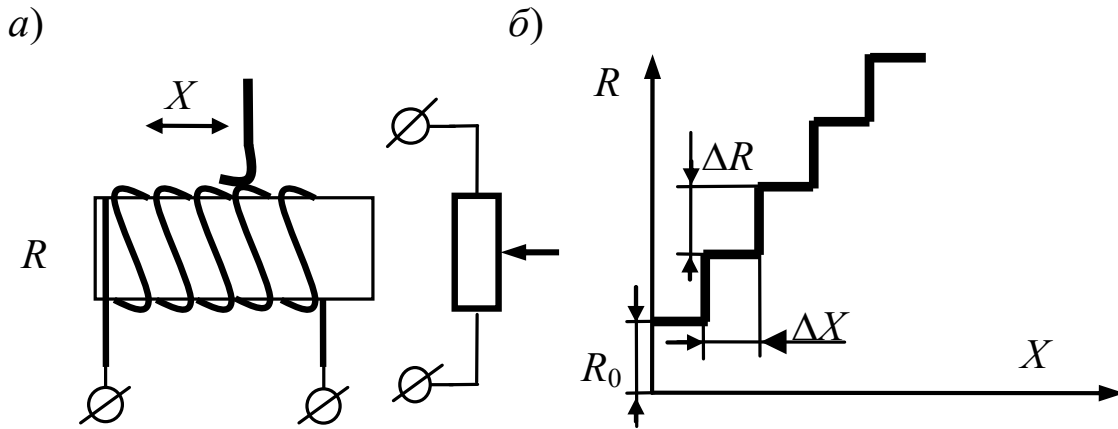
Решая данную систему, находят величины сопротивлений резисторов.

## 2 Практическое занятие № 2. Расчет резистивного преобразователя

В многих цифровых измерительных системах в качестве первичных преобразователей используются резистивные преобразователи. Данные преобразователи представляют собой разновидность параметрических преобразователей, которые под воздействием измеряемой величины изменяют собственное электрическое сопротивление или сопротивление участка цепи. К числу резистивных преобразователей, кроме терморезисторов и фоторезисторов, относятся контактные, реостатные и тензорезисторы. Резистивные преобразователи используются для измерения перемещений, усилий деформации, положения [2, 8].

Реостатные преобразователи – это преобразователи, выполненные в виде реостата, движок которого перемещается под действием входной измеряемой величины (рисунок 2.1). Выходной величиной является электрическое сопротивление, функционально связанное с положением движка. Преобразователи

используются для измерения давления, силы, ускорения, уровня, расхода, положения и других физических величин, которые можно преобразовать в перемещение.



*a* – схема преобразователя; *б* – функция преобразования

Рисунок 2.1 – Реостатный преобразователь с линейной функцией преобразования

В зависимости от конструктивного исполнения преобразователи делятся на преобразователи с линейным и вращательным перемещениями подвижного элемента. При этом функциональная зависимость изменения сопротивления от перемещения может быть линейной или функциональной.

Реостатные преобразователи могут иметь нелинейную функцию преобразования (рисунок 2.2). Это достигается за счет изменения формы каркаса, изменения диаметра проволоки, изменения удельного сопротивления проволоки.

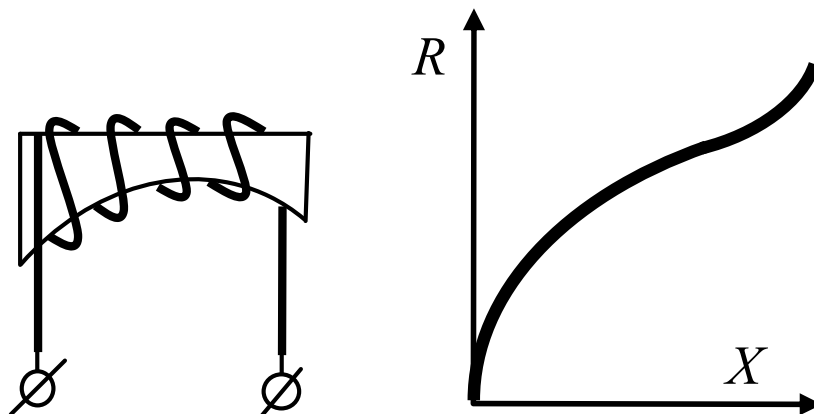


Рисунок 2.2 – Реостатный преобразователь с нелинейной функцией преобразования

Проволока для обмотки выполняется из сплавов. Хорошим, но дорогим материалом является сплав платины с иридием (5 %...30 %). Добавка иридия к платине придает ей большую твердость, увеличивает удельное сопротивление и понижает температурный коэффициент электрического сопротивления. Дешевым и часто используемым материалом является константан. При высоких тем-

пературах применяются нихром и фехраль. Для обмотки преобразователя обычно используется изолированный эмалью или оксидной пленкой провод. После изготовления обмотки изоляция провода счищается в местах соприкосновения его со щеткой.

Щетка преобразователя выполняется либо из проволок, либо из плоских пружинящих полосок, причем используются как чистые металлы (платина, серебро), так и сплавы (платина с иридием, фосфористая бронза, медно-серебряные сплавы и т. д.). Качество контакта щетки и обмотки определяется контактным давлением, которое выбирается в широких пределах: от десятых долей грамма до сотен граммов в зависимости от материалов контакта и обмотки и условий работы преобразователя.

Габариты преобразователя определяются его конструкцией, сопротивлением и величиной мощности, выделяемой в обмотке.

Сопротивление преобразователя можно подсчитать по следующей формуле:

$$R_{II} = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала, из которого изготовлена обмотка преобразователя, Ом·м;

$l$  – длина проволоки преобразователя, м;

$S$  – площадь сечения проволоки, м<sup>2</sup>.

В рассматриваемых реостатных преобразователях зависимость изменения сопротивления от перемещения щетки имеет ступенчатый характер, т. к. сопротивление изменяется скачками на величину сопротивления одного витка. Это вызывает погрешность преобразователя. Максимальная погрешность квантования при этом

$$\gamma_K = (0,5 \cdot \Delta R / R_{II}) \cdot 100 \%,$$

где  $\Delta R$  – максимальное сопротивление одного витка;

$R_{II}$  – полное сопротивление преобразователя.

Суммарная погрешность, вызванная непостоянством параметров резистивных преобразователей, составляет 0,05 %...0,1 %. Температурная погрешность не превышает 0,1 % на 10 °С.

Погрешность квантования отсутствует в реохордных преобразователях (рисунок 2.3), в которых движок скользит вдоль натянутой проволоки. Проволока выполняется из высокоомного материала. Начальное сопротивление преобразователя  $R_0$  – порядка нескольких Ом.

Выходной параметр реостатных преобразователей – сопротивление – измеряется обычно с помощью мостовой схемы.

Достоинство реостатных преобразователей состоит в возможности получения значительного выходного сигнала при сравнительно простой конструкции преобразователя. Недостатки – наличие скользящего контакта, необходи-

мость относительно больших перемещений движка, а иногда и значительного усилия для его перемещения.

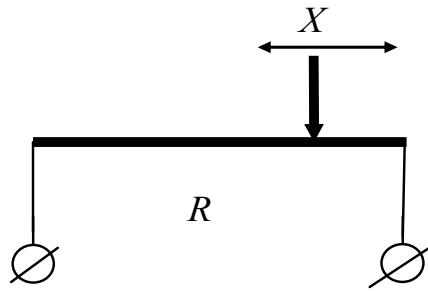


Рисунок 2.3 – Схема реохордного преобразователя

Расчет конструктивных элементов реостатного преобразователя проводится в следующей последовательности.

1 Исходя из заданного диапазона измерения перемещений конструктивно выбирают длину и диаметр каркаса. Размеры каркаса зависят от диапазона измерений, разрешающей способности, области применения.

2 Зная заданную разрешающую погрешность преобразователя, выбирают диаметр проволоки. Диаметр проволоки должен быть в 2–3 раза меньше разрешающей способности (разрешающая способность – заданная величина).

3 Рассчитывают длину проволоки исходя из диаметра каркаса, диаметра проволоки и диапазона измерения, используя следующее выражение:

$$l = \pi (D_K + d_{\Pi}) \cdot \frac{L}{d_{\Pi}}, \quad (2.2)$$

где  $l$  – длина проволоки;

$D_K$  – диаметр каркаса;

$d_{\Pi}$  – диаметр проволоки;

$L$  – длина каркаса.

4 Зная длину проволоки, находят сопротивление преобразователя по формуле (2.1).

В качестве задания студентам предлагается рассчитать резистивный реостатный преобразователь по индивидуальным входным данным.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1 Какие резистивные преобразователи Вы знаете?

2 Принцип действия реостатного преобразователя.

3 Где используются реостатные преобразователи?

4 Как устроен реостатный преобразователь с нелинейной функцией преобразования?

5 От чего зависят разрешающая способность и погрешность реостатного преобразователя?

6 Как выбрать диаметр проволоки преобразователя?

7 Из каких соображений выбираются размеры каркаса преобразователя?

8 Реостатный преобразователь дискретный или аналоговый?

### 3 Практическая работа № 3. Расчет емкостных преобразователей

К емкостным преобразователям относятся устройства, у которых электрическая емкость или диэлектрические потери изменяются под действием входной величины [4, 8].

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

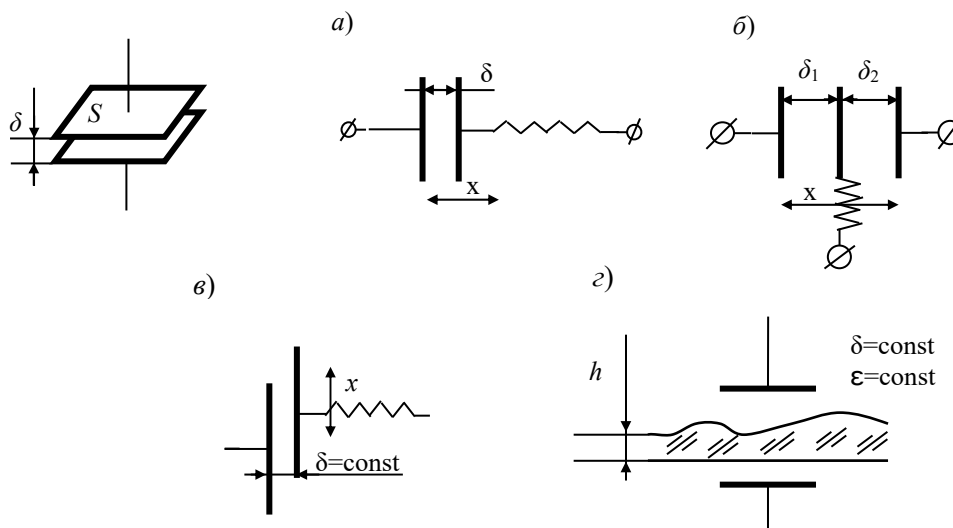
$\varepsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$S$  – площадь пластин, мм<sup>2</sup>;

$\delta$  – расстояние между пластинами, мм.

Изменяя  $\varepsilon$ ,  $S$  и  $\delta$ , можно изменять электрические параметры преобразователя. В связи с этим преобразователи изготавливают с различным конструктивным исполнением.

На рисунке 3.1 показаны используемые схемы преобразователей.



*a* – преобразователь с изменяющимся зазором; *б* – дифференциальный преобразователь с изменяющимся зазором; *в* – преобразователь с изменяющейся площадью; *г* – преобразователь с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

Рисунок 3.1 – Схемы емкостных преобразователей

Чувствительный элемент состоит из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, частично погруженных в жидкость. Электроды образуют цилиндрический конденсатор высотой  $H$ , межэлектродное пространство которого до высоты  $h$  заполнено жидкостью, разность в пространстве  $H - h$  – парогазовой смесью. Для фиксирования взаимного расположения электродов предусмотрен изолятор 3.

В общем виде электрическая емкость цилиндрического конденсатора определяется уравнением

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / [\ln(D/d)], \quad (3.1)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума, ф/м;

$H$  – высота электродов, м;

$D, d$  – диаметры наружного и внутреннего электродов соответственно, м.

Для цилиндрического конденсатора, межэлектродное пространство которого заполняется веществами, обладающими различными диэлектрическими проницаемостями, как показано на рисунке 3.2, полная емкость  $C_n$  определяется выражением

$$C_n = C_0 + C_1 + C_2, \quad (3.2)$$

где  $C_0$  – емкость проходного изолятора, пФ;

$C_1$  – емкость межэлектродного пространства, пФ;

$C_2$  – емкость межэлектродного пространства, заполненного парогазовой смесью, пФ.

С учетом уравнения (3.1) полную емкость чувствительного элемента представим в виде

$$C_n = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{жс}h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r(H-h)}{\ln(D/d)}. \quad (3.3)$$

Так как для паров жидкости и газов  $\epsilon_r \approx 1$ , а  $C_0$  – величина постоянная, уравнение (3.3) можно преобразовать следующим образом:

$$C_n = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/d)} H \left[ 1 + (\epsilon_{жс} - 1) \frac{h}{H} \right]. \quad (3.4)$$

Данное уравнение представляет собой статическую характеристику емкостного преобразователя для неэлектропроводящих сред. Величина  $\epsilon_{жс}$  является функцией температуры, поэтому для исключения влияния температуры жидкости на результат измерения применяют компенсационный конденсатор, ко-

торый размещают ниже емкостного чувствительного элемента и полностью погружают в жидкость. В некоторых случаях при постоянстве состава жидкости его заменяют конденсатором постоянной емкости.

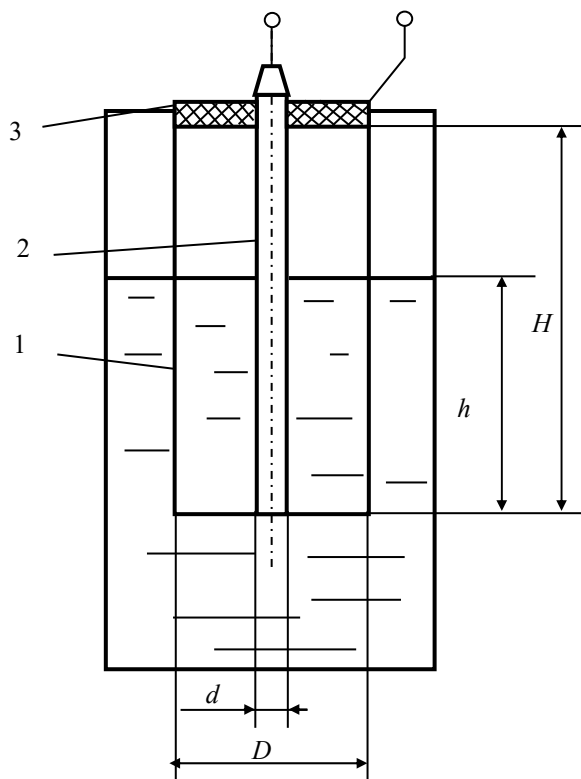


Рисунок 3.2 – Схема емкостного преобразователя для измерения уровня

Для измерения уровня электропроводящих жидкостей применяют уровнемеры, оснащенные емкостным чувствительным элементом с металлическим электродом, покрытым изолирующим материалом (например, фторопластом). Электрод частично погружен в жидкость (рисунок 3.3).

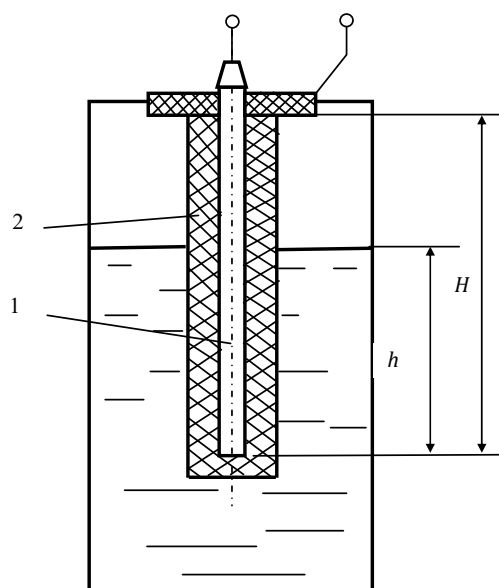


Рисунок 3.3 – Схема емкостного преобразователя для измерения уровня токопроводящих жидкостей

В качестве второго электрода используется либо стенка резервуара, если она металлическая, либо специальный металлический электрод, если стенка выполнена из диэлектрика. Полная емкость такого преобразователя определяется следующим образом:

$$C_n = C_0 \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

где  $C_0$  – емкость проходного конденсатора, пФ;

$C_1$  – емкость конденсатора, образованного электродом 1 и поверхностью жидкости на границе с изолятором, пФ;

$C_2$  – емкость конденсатора, образованного поверхностью жидкости на границе с изолятором и стенками резервуара, пФ.

Преобразование электрической емкости в электрический сигнал может осуществляться разными методами: цепями в виде делителей, мостами переменного тока, резонансными и частотными методами.

Рассмотрим в качестве примера цепь в виде делителя.

Емкость большинства преобразователей составляет  $10 \dots 100$  пФ, и поэтому даже при относительно высоких частотах напряжения питания ( $10^5 \dots 10^7$  Гц) их выходные сопротивления велики и равны  $X_c = 1/\omega C = 10^3 \dots 10^7$  Ом. Выходная мощность преобразователя мала и поэтому требует применения усилителей.

Основной трудностью построения измерительных цепей с емкостными преобразователями является защита их от наводок. Для этих целей как сами преобразователи, так и все соединительные кабели тщательно экранируются.

На рисунке 3.4 приведена схема цепи с операционным усилителем, построенная по принципу делителя напряжения.

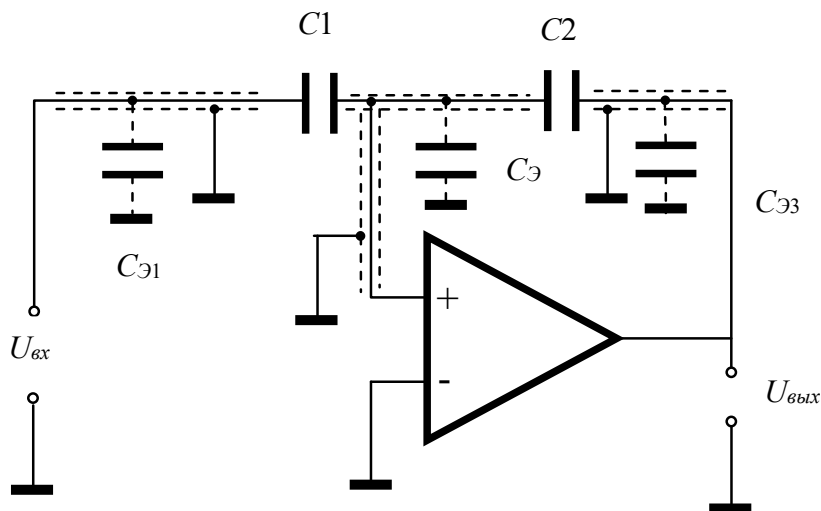


Рисунок 3.4 – Схема включения преобразователя, построенная по принципу делителя напряжения

В данном случае

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{C_1}{C_2}.$$

С помощью такой цепи удобно преобразовывать в напряжение изменение зазора между обкладками конденсатора  $C_2$  ( $U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{C_1 \delta_2}{\varepsilon_0 S_2}$ ) или изменение площади конденсатора  $C_1$  ( $U_{\text{вых}} = U_{\text{п}} \frac{\varepsilon_0 S_1}{\delta_1 C_2}$ ). В обоих случаях зависимость выходного напряжения от измеряемых величин будет линейной.

В данной схеме емкости экранированных проводов  $C_{Э1}$ ,  $C_{Э2}$ ,  $C_{Э3}$  практически не влияют на работу измерительного устройства. Это объясняется тем, что емкости  $C_{Э1}$  и  $C_{Э3}$  включены параллельно источнику сигнала  $U_{\text{п}}$  и операционному усилителю. Емкость же  $C_{Э2}$  включена параллельно входам операционного усилителя и напряжение на ней близко к нулю.

В качестве задания студентам выдаются задания для расчета емкостного преобразователя измерения уровня диэлектрической жидкости.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Для каких целей используются емкостные преобразователи?
- 2 Какие типы емкостных преобразователей Вы знаете?
- 3 Какой тип преобразователя необходимо использовать для измерения толщины полимерной пленки?
- 4 Какие источники необходимо использовать для питания емкостных преобразователей?
- 5 Поясните достоинства и недостатки емкостных преобразователей.
- 6 Какой тип преобразователя необходимо использовать, чтобы функция преобразования была линейной?
- 7 Исходя из каких условий выбирается входное напряжение в схеме включения преобразователя, построенной по принципу делителя напряжения?

## **4 Практическое занятие № 4. Расчет измерительных мостов постоянного и переменного тока**

В измерительных цепях постоянного и переменного тока для подключения первичных пассивных преобразователей неэлектрических величин часто используются измерительные мосты, преобразующие заданную величину в напряжение или ток, который затем преобразуется в цифровую форму [3, 4, 8].

Мосты могут быть дифференциальные и нулевые (неуравновешенные и уравновешенные). Мосты постоянного тока выполняются в виде двухплечих, одинарных (четырёхплечих), двойных (шестиплечих). Индикаторами равнове-

сия в них служат гальванометры постоянного тока, электрометры, автокомпенсационные микровольтамперметры. Такие мосты используются для измерения больших и малых сопротивлений (рисунок 4.1).

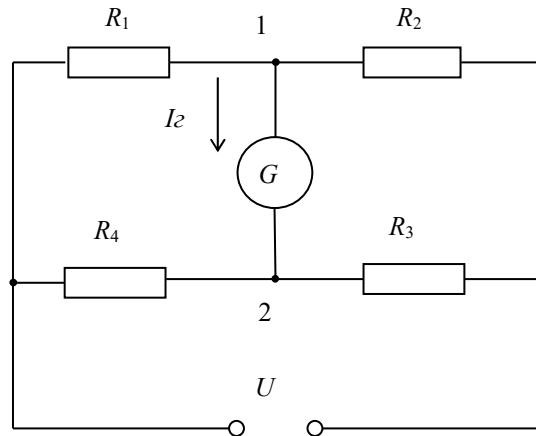


Рисунок 4.1 – Схема моста постоянного тока для измерения сопротивления

Мосты переменного тока делятся на одинарные и двойные, Т-образные. По характеру плеч мосты бывают индуктивные и безиндуктивные, а по влиянию частоты – частотнозависимые и частотнонезависимые. В качестве индикаторов используются электронные индикаторы с регулируемой чувствительностью (усилитель переменного тока с входным сопротивлением 150...200 кОм, линейный детектор, магнитоэлектрический прибор).

Расчет производится по любому методу расчета сложных цепей. Ток гальванометра определим по методу эквивалентного генератора:

$$I_G = U_{xx1,2} / (R_3 + R_G), \quad (4.1)$$

где  $U_{xx1,2}$  – напряжение между точками 1, 2 при разомкнутой цепи индикатора равновесия, В;

$R_3$  – сопротивление цепи между точками 1, 2 (цепь индикатора разомкнута), а источник  $U$  заземлен внутренним сопротивлением, Ом;

$R_G$  – сопротивление цепи индикатора гальванометра, Ом.

Преобразуем и найдем  $I_G$ :

$$\begin{aligned} I_G &= U \frac{R_1 / (R_1 + R_2) - R_4 / (R_3 + R_4)}{R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) + R_3 \cdot R_4 / (R_3 + R_4 + R_G)} = I_G \cdot R_G = \\ &= U \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{R_1 \cdot R_3 (R_3 + R_4) + R_3 \cdot R_4 (R_1 + R_2) + R_G \cdot (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \end{aligned}$$

Изменяя значение сопротивления одного или нескольких плеч моста, доводят до нуля ток  $I_G = 0$ .

Равновесие моста наступает при выполнении следующего условия:

$$R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4 = 0.$$

Тогда  $R_x = R_1 = R_2 \cdot R_4 / R_3$ .

Отношение изменения  $\Delta I_G$ , или  $\Delta U_G$ , или  $\Delta P_G$  в цепи индикатора к относительному изменению  $\Delta R$  либо к абсолютному изменению  $R$  называется чувствительностью моста.

$$S_I = \Delta I_G / (\Delta R / R) \text{ или } S_I = \Delta I_G / \Delta R;$$

$$S_V = \Delta U_G / (\Delta R / R) \text{ или } S_V = \Delta U_G / \Delta R. \quad (4.2)$$

Двойной мост (рисунок 4.2) используется в основном для высокоточных измерений малых сопротивлений от  $10^{-6}$  до 10 Ом. В приведенной схеме  $R_0$  – образцовое сопротивление,  $R$  – сопротивление малой величины.

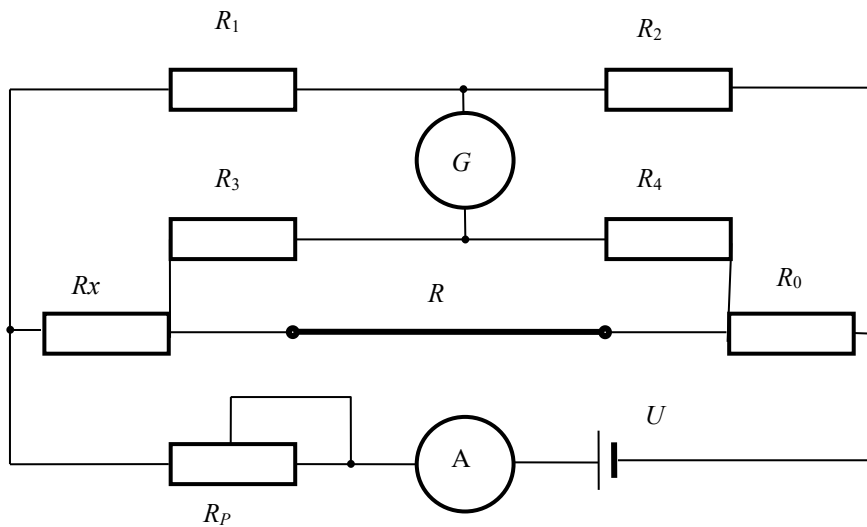


Рисунок 4.2 – Схема двойного моста постоянного тока

Мосты переменного тока используются для измерения  $R$ ,  $C$  и  $L$ .

Поскольку сопротивления плеч моста переменного тока в общем случае комплексные, то необходимо учитывать соотношение фаз в плечах моста.

Для равновесных мостов переменного тока (рисунок 4.3) справедливо соотношение  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$  или  $Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4$ . Если записать в показательной форме

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot Z_3 \cdot e^{j\varphi_3} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot Z_4 \cdot e^{j\varphi_4}, \quad (4.3)$$

то отсюда следует, что для уравновешивания моста необходимо не только равенство модулей сопротивлений плеч моста, а также и равенство сумм соответствующих фаз:

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (4.4)$$

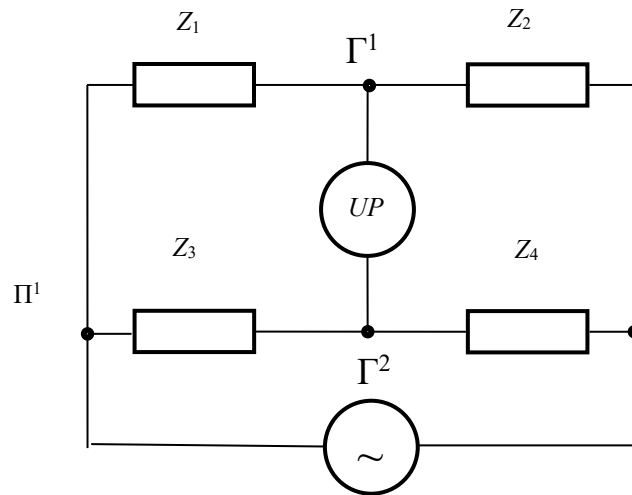


Рисунок 4.3 – Схема моста переменного тока

Для моста переменного тока найдем сопротивление со стороны зажимов  $\Pi^1$  и  $\Pi^2$

$$Z_{\Pi} = \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot (Z_3 + Z_4)}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} = Z_1 \cdot \frac{(1+m) \cdot n}{1+n}; \quad (4.5)$$

со стороны зажимов  $\Gamma^1$  и  $\Gamma^2$

$$Z_{\Gamma} = \frac{(Z_1 + Z_4) \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4} = Z_1 \cdot \frac{(1+n) \cdot m}{1+m}; \quad (4.6)$$

$$m = \frac{Z_2}{Z_1}; \quad n = \frac{Z_4}{Z_1}. \quad (4.7)$$

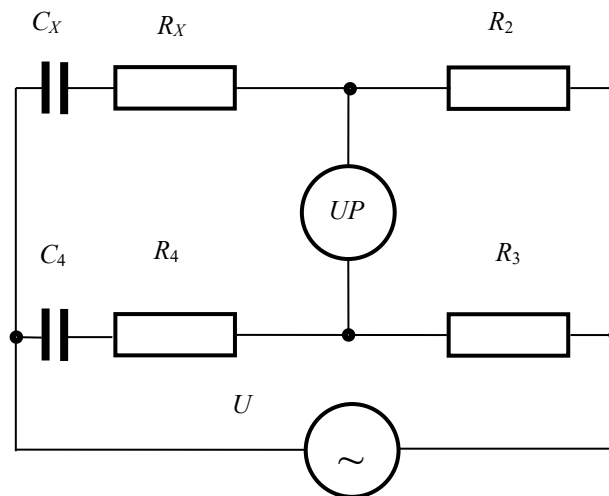


Рисунок 4.4 – Схема моста переменного тока для измерения емкости

В соответствии с обозначениями элементов, принятых на рисунке 4.4, условие равновесия при изменении емкости имеет следующее выражение:

$$\left( R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_3 = R_2 \left( R_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \right), \quad (4.8)$$

откуда

$$C_x = C_4 \frac{R_3}{R_2}; \quad R_x = \frac{R_4}{R_3}. \quad (4.9)$$

Обычно вместо  $R_x$  измеряют либо тангенс угла потерь  $\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x$  в конденсаторе, либо добротность  $Q = 1/\operatorname{tg} \delta_x$ . Подставив в выражение для  $\operatorname{tg} \delta_x$  значения  $R_x$  и  $C_x$ , получим  $\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_4 C_4$ .

В качестве задания студентам выдаются данные для расчета моста постоянного тока, используемого для измерения сопротивления.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Для чего используются мосты постоянного тока?
- 2 Для чего используются мосты переменного тока?
- 3 Какие типы мостов Вы знаете?
- 4 С какой целью используется двойной мост постоянного тока?
- 5 Как определить условие равновесия моста постоянного тока?
- 6 Как определить условие равновесия моста переменного тока?

## **5 Практическое занятие № 5. Расчет оптических схем бесконтактных преобразователей**

*Линзовые оптические системы.* Оптические преобразователи находят все более широкое применение благодаря своим некоторым отличительным особенностям, главные из которых бесконтактность, помехоустойчивость, высокое быстродействие, а в ряде случаев невозможность использования других преобразователей.

Основными при расчете оптической системы преобразователя являются геометрический и энергетический расчеты.

*Геометрический расчет оптической системы.* Оптическая система прибора может иметь один, два или более компонентов [7].

*Оптическая система с одним компонентом* является наиболее простой по своей реализации.

На рисунке 5.1 изображена оптическая схема с одним оптическим элементом, где введены следующие обозначения:  $a$ ,  $b$  – линейные размеры излучаю-

щей поверхности;  $e$ ,  $h$  – линейные размеры приемника;  $l$  – расстояние между объективом и источником излучения;  $l'$  – расстояние между объективом и приемником.

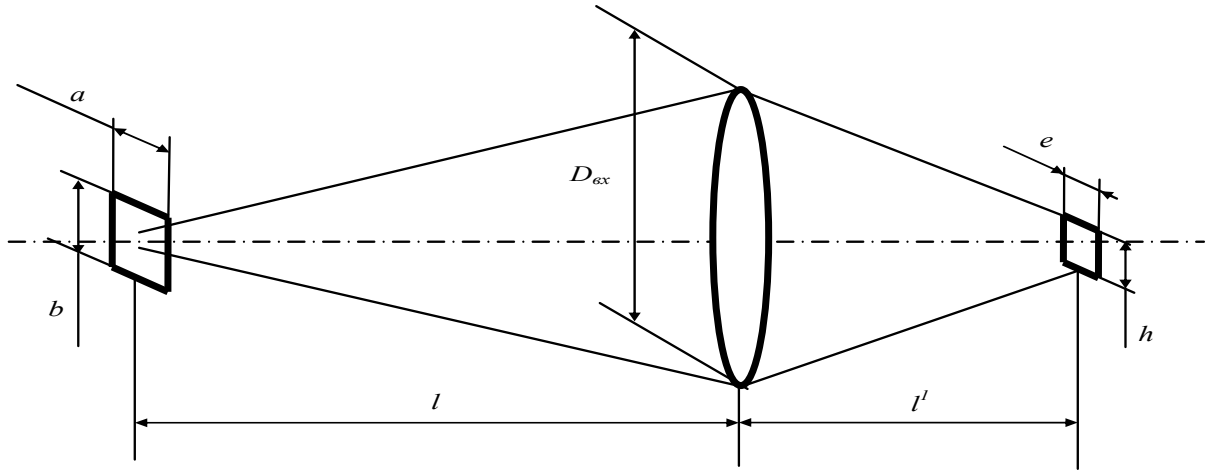


Рисунок 5.1 – Оптическая схема с одним компонентом

Размеры изображения излучающей поверхности обозначим  $a'$  и  $b'$ . Уместим изображение излучателя в пределах поверхности приемника, т. е. положим, что  $a' < e$ ,  $b' < h$ .

Линейное увеличение

$$\beta = \frac{a'}{a} = \frac{l'}{l}. \quad (5.1)$$

Подставляя  $a' < e$ , получим расстояние до приемника

$$l' \leq \frac{el}{a}. \quad (5.2)$$

Расстояние  $l$  может быть задано исходя из назначения и применения прибора. Тогда положение приемника определяется из (5.2).

Фокусное расстояние объектива

$$f = \frac{l \cdot l'}{l + l'}. \quad (5.3)$$

При очень большом расстоянии  $l$  до излучателя приемник располагается в фокальной плоскости объектива, как следует из (5.3).

Диаметр входного отверстия  $D_{\text{вх}}$  находится из формулы

$$D_{\text{вх}} = 2l \sqrt{\frac{\Phi_{\text{min}}}{\tau \cdot \pi \cdot L_e \cdot S_{\text{изл}}}}, \quad (5.4)$$

где  $\Phi_{\text{min}}$  – минимальное значение потока на поверхности фотоприемника, лм;  
 $\tau$  – коэффициент пропускания оптической системы;

$L_e$  – энергетическая яркость,  $\text{Вт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  ( $\Phi_0 = \pi \cdot L_e \cdot S_{\text{изл}}$ );

$S_{\text{изл}}$  – площадь излучающей поверхности,  $\text{м}^2$ .

Или по формуле

$$D_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{\Phi_{\text{min}}}{\tau \cdot \pi \cdot E_e}} = 2l \sqrt{\frac{\Phi_{\text{min}}}{2 \cdot \pi \cdot \tau \cdot I_e}}. \quad (5.5)$$

Размеры  $l$  и  $D_{\text{ex}}$  определяют продольные и поперечные размеры оптической системы.

При отдаленном источнике светочувствительная поверхность приемника располагается в фокальной плоскости объектива. Если наибольший угловой размер источника излучения равен  $2\gamma$ , то линейный размер изображения источника излучения

$$a^1 = 2f^1 \cdot \text{tg}\gamma. \quad (5.6)$$

Чтобы изображение уместилось на светочувствительной поверхности фотоприемника, необходимо иметь  $a' < e$ .

Откуда фокусное расстояние

$$f^1 = l^1 = \frac{e}{2\text{tg}\gamma}. \quad (5.7)$$

При использовании схем с одним компонентом в осветительных устройствах источник излучения устанавливается в фокальной плоскости компонента, если стремятся получить параллельный пучок, либо на расстоянии, немного превышающем фокусное, если надо получить сходящийся пучок.

*Оптическая система с двумя компонентами.* В зависимости от назначения система имеет несколько вариантов. Оптическая схема с двумя компонентами при удаленном источнике приведена на рисунке 5.2 [7].

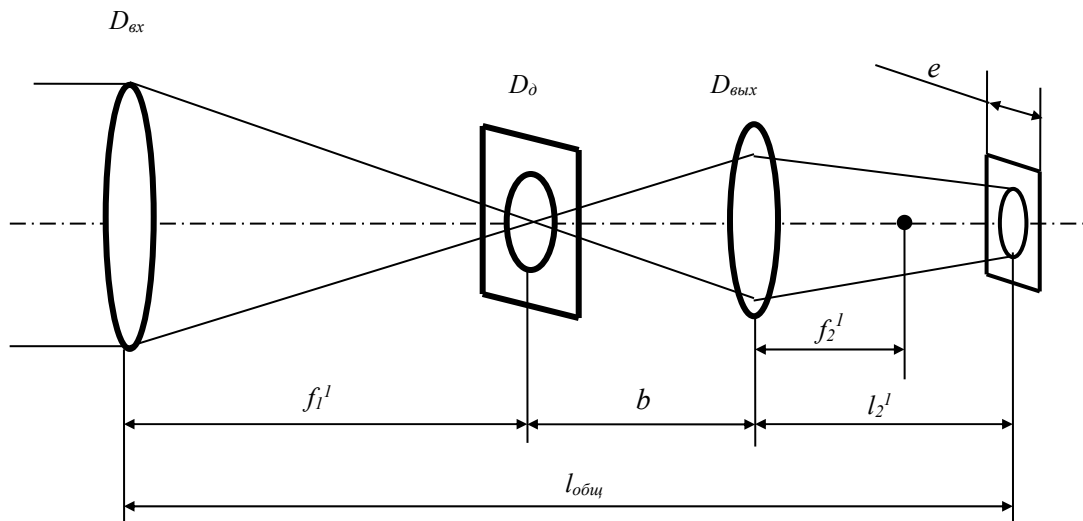


Рисунок 5.2 – Оптическая система с двумя компонентами при отдаленном излучателе

Габариты такой системы определяются из следующих условий.

Диаметр объектива находится по одной из формул: (5.4) или (5.5). Фокусное расстояние объектива  $f_1'$  устанавливается конструктивно по известным в оптике значениям допустимого относительного отверстия  $D_{\text{ex}}/f_1'$ . Будем считать, что  $f_1' \approx (4 \dots 5) D_{\text{ex}}$ .

Для того чтобы поток, попавший в оптическую систему, не проходил мимо светочувствительной поверхности приемника, диаметр выходного зрачка  $D_{\text{вых}} < e$ , при этом  $e$  – наименьший линейный размер чувствительной поверхности фотоприемника.

Расстояние между конденсором и фотоприемником

$$l_2^1 = \frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{ex}}}(f_1' + b) \leq \frac{e}{D_{\text{ex}}}(f_1' + b). \quad (5.8)$$

Расстояние  $b$  между фокальной плоскостью объектива и конденсором должно быть больше фокусного расстояния конденсора

$$b = \left( \frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{ex}}} \right) \cdot f_1'. \quad (5.9)$$

Расстояние  $b$  также устанавливается конструктивно.

Фокусное расстояние конденсора

$$f_2^1 = \frac{(f_1' + b) \cdot l_2^1}{f_1' + b + l_2^1}. \quad (5.10)$$

Диаметр полевой диафрагмы

$$D_n = 2f_1' \cdot \text{tg}\gamma, \quad (5.11)$$

где  $\gamma$  – угол поля зрения.

Общая длина системы

$$l_{\text{общ}} = f_1' + b + l_2^1. \quad (5.12)$$

На рисунке 5.3 представлена схема с двумя компонентами, предназначенная для просвечивания объекта измерения параллельным пучком.

Для получения параллельного пучка источник располагается в передней фокальной плоскости объектива. Расстояние между объективом и коллективом  $d$  является заданным. Фокусное расстояние объектива  $f_1$  выбирается так, чтобы передний фокальный угол был достаточно велик и использование потока излучателя не оказалось слишком малым.

Обычно передний апертурный угол не превышает  $30^\circ$ , если не использовать сложные осветительные системы. Диаметр объектива определяется по формулам (5.4) или (5.5). Диаметр выходного зрачка  $D_{\text{вых}} \leq e$ , где  $e$  – наименьший линейный размер поверхности фотоприемника.

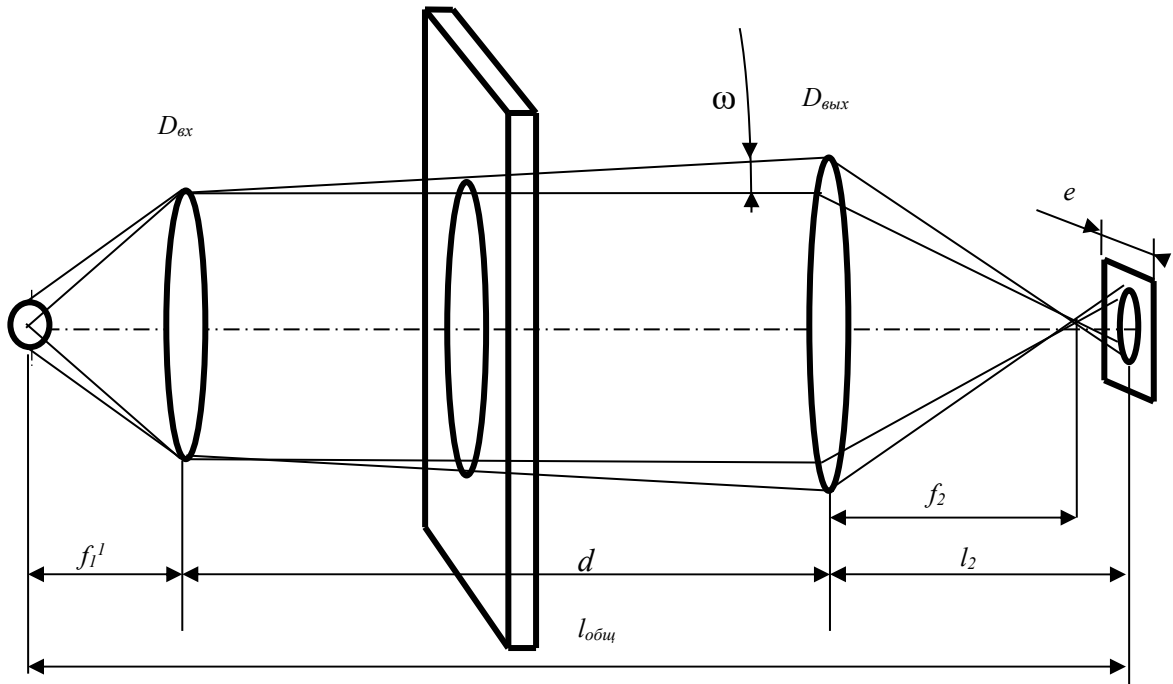


Рисунок 5.3 – Оптическая система с двумя компонентами, предназначенная для просвечивания объектов измерения

Расстояние между коллективом и фотоприемником

$$l_2^1 = \frac{D_{\text{вых}}}{D_{\text{ex}}} d \leq \frac{e}{D_{\text{ex}}} d. \quad (5.13)$$

Фокусное расстояние коллектива

$$f_2^1 = \frac{d \cdot l_2^1}{d + l_2^1}. \quad (5.14)$$

Наиболее удаленная от оптической оси точка поверхности излучателя создает параллельный пучок, направление оси которого составляет наибольший угол  $\omega$  с оптической осью. Ось пучка пересекает ось у поверхности приемника, и, как отмечено при рассмотрении предыдущей системы, сечения всех пучков на поверхности фотоприемника сольются в одно светлое пятно.

Угол  $\omega$  определяется соотношением

$$\text{tg}\omega = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2 \cdot f_1}. \quad (5.15)$$

Диаметр коллектива

$$D_k = D_{\text{ex}} + 2d \cdot \text{tg}\omega. \quad (4.16)$$

Общая длина оптической системы

$$l_{\text{общ}} = f_1^1 + d + l_2^1. \quad (5.17)$$

Оптическая схема с четырьмя компонентами представлена на рисунке 5.4. Такая схема может быть использована в приборах, имеющих оптический модулятор [7].

Расчет такой оптической схемы довольно прост, т. к. все элементы схемы находятся в фокальных плоскостях оптических компонентов. Зная геометрические размеры источника излучения  $D_{ис}$ , диафрагмы (отверстий модулятора)  $D_{\delta}$  и размеры светочувствительной поверхности фотоприемника  $D_{\phi n}$  из формулы подобия рассчитываются фокусные расстояния линз:

$$\frac{D_{ис}}{D_{\delta}} = \frac{f_1}{f_2}; \quad \frac{D_{\delta}}{D_{\phi n}} = \frac{f_3}{f_4}; \quad (5.18)$$

Размер  $d$  выбирается конструктивно, исходя из условий закрепления линз. Общая длина оптической системы

$$l_{общ} = f_1 + 2d + f_2 + f_3 + f_4. \quad (5.19)$$

В качестве задания студентам выдаются данные для расчета одной из рассмотренных выше оптических схем.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

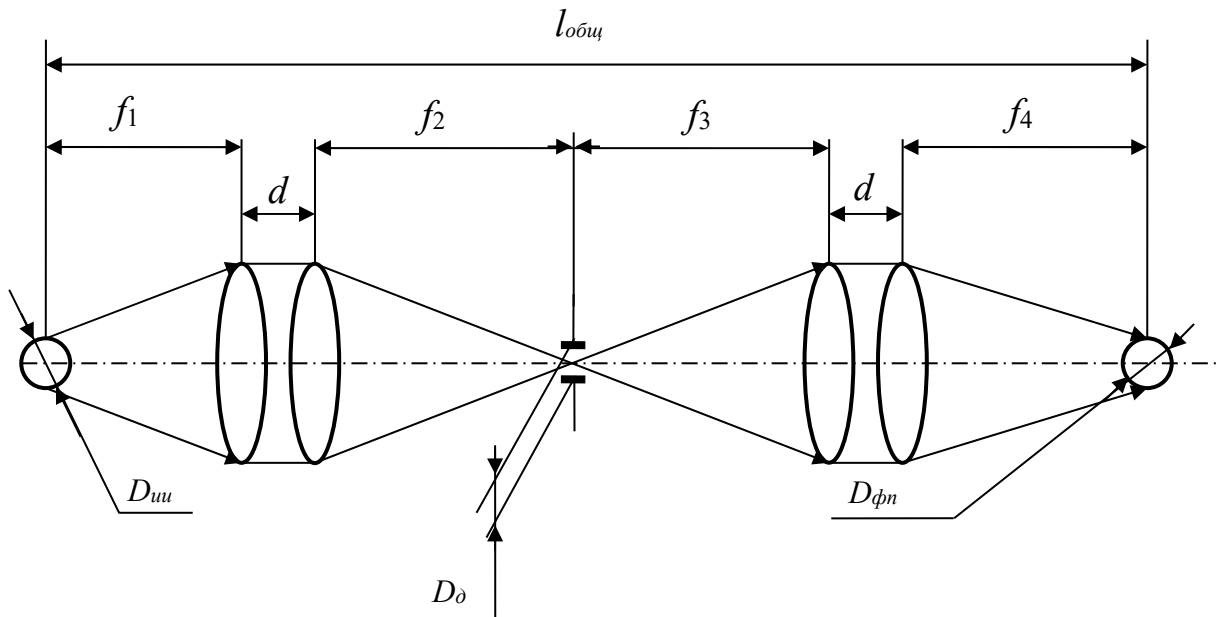


Рисунок 5.4 – Оптическая схема с четырьмя компонентами, используемая для оптических модуляторов

### Контрольные вопросы

1 Для измерения каких физических величин используются оптические преобразователи?

2 Какие оптические системы Вы знаете?

3 Какое соотношение между диаметром линзы и ее фокусным рассеянием должно выполняться при выборе линз?

4 В каких случаях используется оптическая система с двумя компонентами?

5 В каких случаях используется оптическая система с одним компонентом?

6 В каких случаях используется оптическая система с четырьмя компонентами?

7 Что означает понятие «геометрический расчет оптической схемы»?

## 6 Практическое занятие № 6. Расчет оптических схем бесконтактных преобразователей

*Волоконно-оптические преобразователи.* Волоконные световоды представляют собой набор тонких стеклянных светопроводящих волокон диаметром 9...30 мкм, собранных в жгут. Каждый элементарный световод (волокно с большим показателем преломления) покрыт снаружи тонким слоем (1...2 мкм) стекла с более низким показателем преломления [8, 9].

На границе «волокно – покрытие» в результате явления полного внутреннего отражения происходит отражение света, входящего в основное волокно, что обеспечивает его прохождение по световоду с минимальным ослаблением (рисунок 6.1).

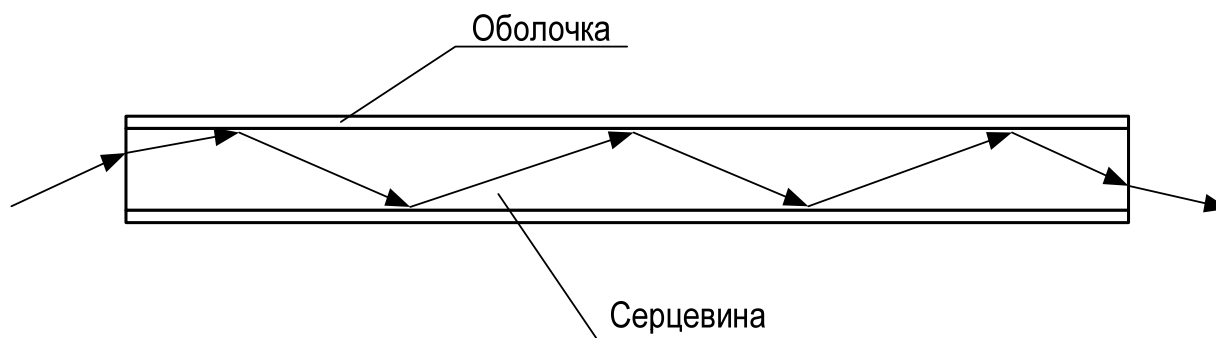


Рисунок 6.1 – Ход лучей в волоконно-оптическом световоде

При значительных размерах световода число отражений бывает более  $10^6$ . Это приводит к ослаблению сигнала, которое связано с длиной световода экспоненциальной зависимостью.

Максимальный угол  $u_{\max}$ , под которым свет может войти в световод без нарушения условий полного внутреннего отражения, определяется по формуле

$$u_{\max} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где  $n_1, n_2$  – показатели преломления сердцевинки и оболочки.

При  $n_1 = 1,7-1,8$  и  $n_2 = 1,5$ ,  $u_{\max} = 60^\circ$ .

Коэффициент пропускания световодов составляет примерно 40 %...50 %.

Спектр пропускания световода определяется свойствами материала, из которого он изготовлен. Обычные световоды из стекла прозрачны в области  $0,4 \dots 2,0$  мкм. Для работы в ультрафиолетовой области используют кварцевые волокна, прозрачные в диапазоне  $0,2 \dots 4,0$  мкм.

В инфракрасном диапазоне ( $0,9 \dots 10,0$  мкм и более) применяют волокна из специальных халькогенидных бескислородных стекол.

Световоды для передачи световой энергии изготавливают из беспорядочно уложенных волокон диаметром около 30 мкм. Такие световоды называются нерегулярными.

Волоконно-оптические световоды используются для изготовления волоконно-оптических преобразователей (ВОП) физических величин, таких как температура, положение, перемещение, усилие, деформация и пр.

Наиболее просты по конструкции ВОП, где под воздействием физической величины изменяется интенсивность потока некогерентного излучения [6].

Оптический канал (рисунок 6.2) может быть выполнен в виде двух световодов (единичных оптических волокон или жгутов волокон) и промежутка между ними. Поток излучения от источника вводится в передающий световод 1. На выходе передающего световода в зоне измерений формируется поток излучения, заключенный в конусе апертуры световода. Часть потока излучения падает на вход световода 2, выводится из зоны измерений к фотоприемнику и преобразуется в пропорциональный электрический сигнал.

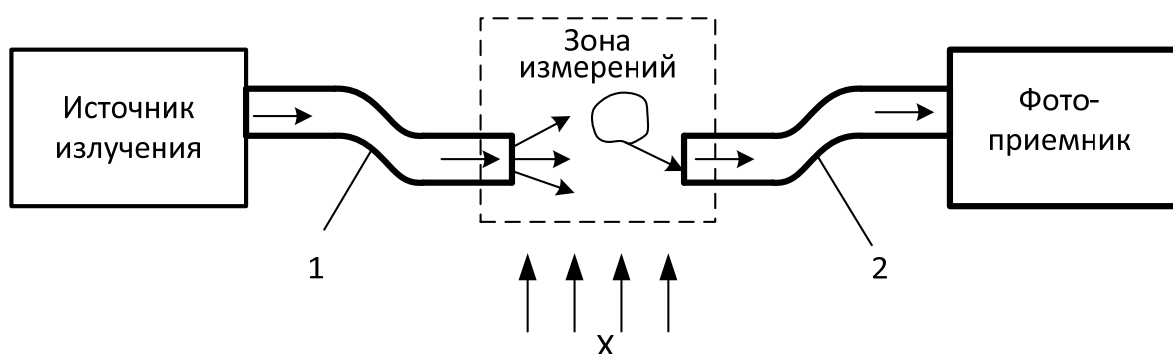


Рисунок 6.2 – Схема ВОП с внешней модуляцией

Физическую основу работы таких ВОП составляет изменение (под действием измеряемого параметра) интенсивности излучения, проходящего с выхода передающего световода на вход приемного световода в соответствии с диаграммой направленности, светопропусканием световодов и способами модуляции.

С учетом того, что в данном случае волоконно-оптический канал в значительной степени определяет метрологические и конструктивные характеристики преобразователей, а также того, что модуляция потока излучения осуществляется в промежутке между двумя световодами, эти устройства получили название «волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией».

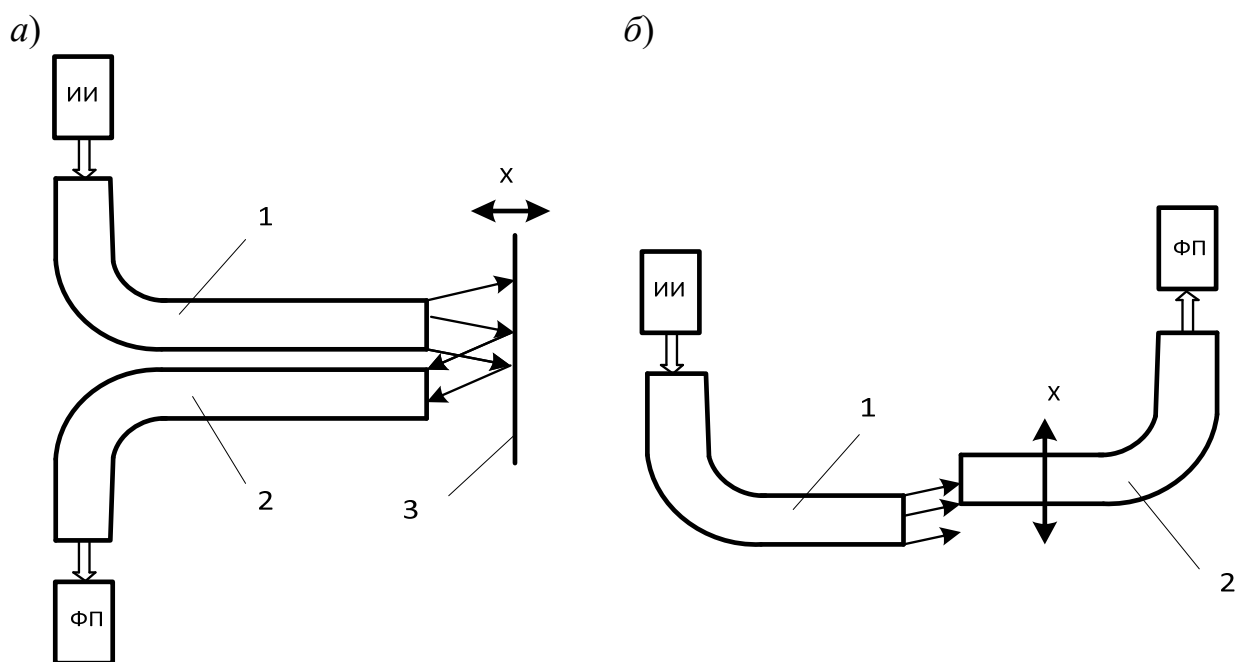
Волоконно-оптические преобразователи такого типа, наряду с достоинствами оптрона с открытым каналом, имеют такие преимущества, как слабая за-

висимость результатов измерений от температуры, электромагнитных полей большой интенсивности и вибраций в зоне измерений, стойкость к агрессивным средам и химическая инертность, высокая локальность измерений, возможность получения заданных конструктивных и метрологических характеристик за счет конструкции волоконно-оптических каналов при использовании серийно выпускаемой элементной базы (источник излучения, фотопреобразователи, волоконно-оптические элементы).

Для ВОП характерны два основных способа получения измерительной информации.

*Первый способ* отражает работу ВОП рефлектометрического типа, для которых наиболее характерно отсутствие контакта с объектом измерений или вспомогательным измерительным звеном. Здесь поток излучения с выхода передающего световода направляется на отражающую поверхность объекта и часть отраженного потока, зависящая от положения поверхности объекта, ее формы и отражающих свойств, воспринимается входным торцом приемного световода.

*Второй способ* характерен для ВОП проходящего типа, где поток излучения, выходящий с торца передающего световода, направляется на торец приемного световода и модуляция осуществляется либо изменением взаимного расположения торцов под действием физической величины (рисунок 6.3), либо изменением условий распространения потока между неподвижными каналами.

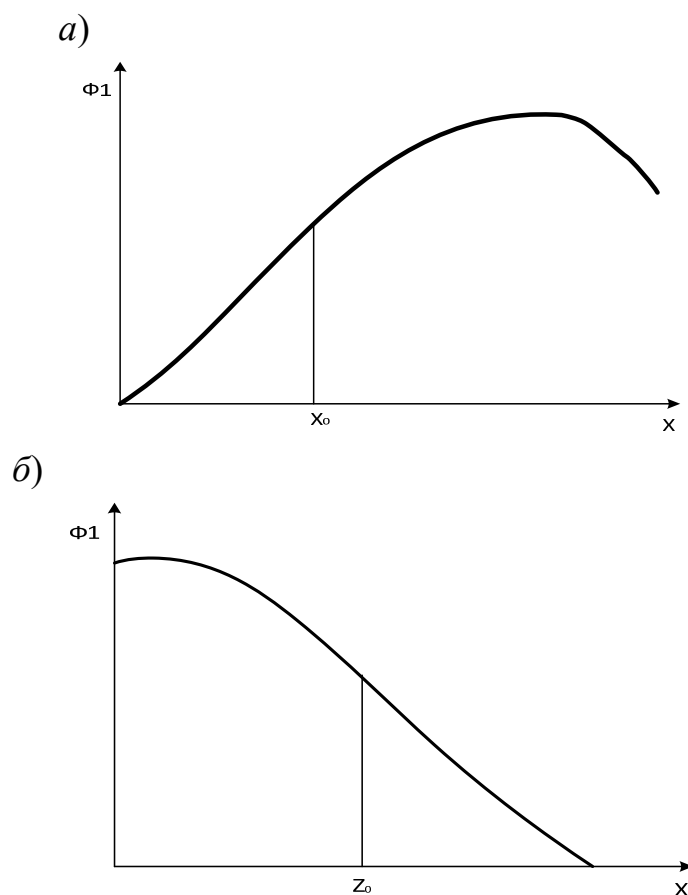


*а* — схема ВОП с перемещающейся отражающей поверхностью; *б* — схема ВОП с перемещающимся приемным световодом; ИИ — источник излучения; ФП — фотопреобразователь; 1 — излучающий световод; 2 — приемный световод; 3 — отражающая поверхность

Рисунок 6.3 — Схемы ВОП проходящего типа

В ряде случаев конструкция ВОП проходящего типа содержит дополнительное механическое звено, обеспечивающее преобразование физической величины в перемещение одного из каналов.

Формирование отклика ВОП проходящего типа можно показать на примере с ортогональным перемещением торцов световодов. Если торцы параллельны и оси совпадают, то поток, передаваемый к фотоприемнику, максимален. При ортогональном перемещении торцов начинается выход лучей, переносящих большую часть общего потока излучения за пределы торца приемного световода. Однако эти потери частично компенсируются потоком, создаваемым лучами, переносящими меньшие элементарные потоки. Дальнейшее смещение приводит к тому, что уменьшается принимаемый поток (рисунок 6.4). При еще больших смещениях это изменение становится более плавным. Из рисунка видно, что преобразование перемещений целесообразно вблизи точек перегиба ( $x_0, z_0$ ) на участках наибольшей крутизны и линейности.



$a$  – ВОП с перемещающейся отражающей поверхностью;  $б$  – ВОП с перемещающимся приемным световодом

Рисунок 6.4 – Внешний вид функций преобразования ВОП проходящего типа

Диапазон измерения линейных перемещений таких ВОП зависит от апертурного угла световода и от размеров излучающего и приемного торцов световодов.

В качестве задания студентам предлагается рассчитать функцию преобразования ВОП с отражающей поверхностью с торцами волоконных элементов прямоугольной формы.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1 На каком физическом явлении основана работа волоконного световода? Объясните принцип данного явления.

2 Где используются волоконно-оптические элементы?

3 При измерении каких физических величин могут быть использованы волоконно-оптические преобразователи?

4 Объясните принцип работы ВОП проходящего типа с перемещающейся отражающей поверхностью.

5 Объясните принцип работы ВОП проходящего типа с перемещающимся приемным световодом.

6 Перечислите основные достоинства ВОП.

## **7 Практическое занятие № 7. Энергетический расчет оптического тракта**

Цель энергетического расчета определение величины потока, достигающего фотопреобразователя, исходя из мощности источника излучения, потерь в оптической системе и влияния функции преобразования [7].

В общем случае величина потока, достигшего светочувствительной поверхности фотоприемника, определяется следующим соотношением:

$$\Phi_{\text{фп}} = \Phi_u \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 \cdot \tau_5 \cdot f(x). \quad (7.1)$$

Коэффициент полезного действия конденсора  $\tau_1$  определяется диаграммой направленности источника излучения и геометрическими параметрами конденсора.

Для лампы накаливания

$$\tau_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right). \quad (7.2)$$

Для светодиодов расчет ведется исходя из заданной диаграммы направленности излучения.

На миллиметровке строится диаграмма направленности излучения светодиода, которая берется из справочников по источникам излучения (рисунок 7.1).

На расчетном расстоянии, в масштабе, располагается первая линза оптической системы  $D_1$ . Вычисляется единичная площадь  $S_1$  диаграммы направленности светодиода. Далее вычисляется площадь  $S_2$  ограниченная углом  $2\alpha$  на

диаграмме направленности. Коэффициент  $\tau_1$  вычисляется как отношение площадей  $S_2$  и  $S_1$ :

$$\tau_1 = S_1/S_2.$$

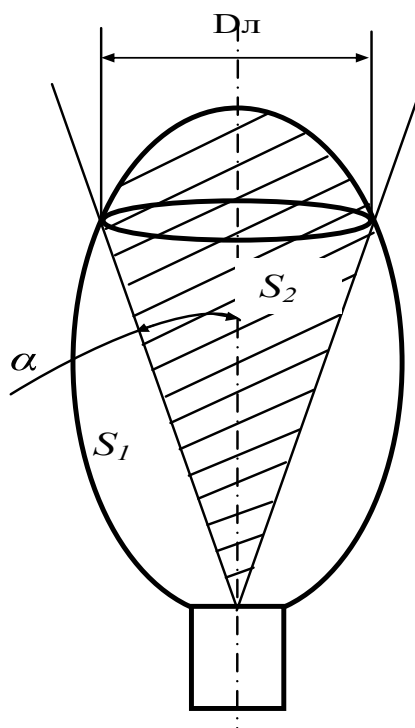


Рисунок 7.1 – Схема расчета  $\tau_1$  для светодиода

Для расчета коэффициента  $\tau_2$  на миллиметровой бумаге строятся относительные спектральные характеристики светодиода и фотоприемника. Затем строят суммарную характеристику путем перемножения величин численных значений относительных величин фотоприемника и светодиода. Коэффициент  $\tau_2$  вычисляется как отношение площадей  $S_2$  и  $S_1$  (рисунок 7.2):

$$\tau_2 = S_1 / S_2.$$

Коэффициент потерь  $\tau_3$  возникает в связи с потерями на оптических элементах – френелевскими потерями, появляющихся.  $\tau_3 = 0,95$  на каждый переход из одной оптической среды в другую.

Коэффициент потерь  $\tau_4$  – потери в среде, где распространяется излучение, в воздухе  $\tau_4 = 1$ .

Коэффициент потерь  $\tau_5$  – потери, связанные с использованием светочувствительной поверхности фотопреобразователя.

Ток фотоприемника находится исходя из найденного значения  $\Phi_{\phi n}$  и чувствительности выбранного фотопреобразователя.

$$I = \Phi_{\phi n} \cdot S_{\phi n}. \quad (7.4)$$

Далее производится расчет согласующего усилителя. Схема включения светодиода представлена на рисунке 7.3.

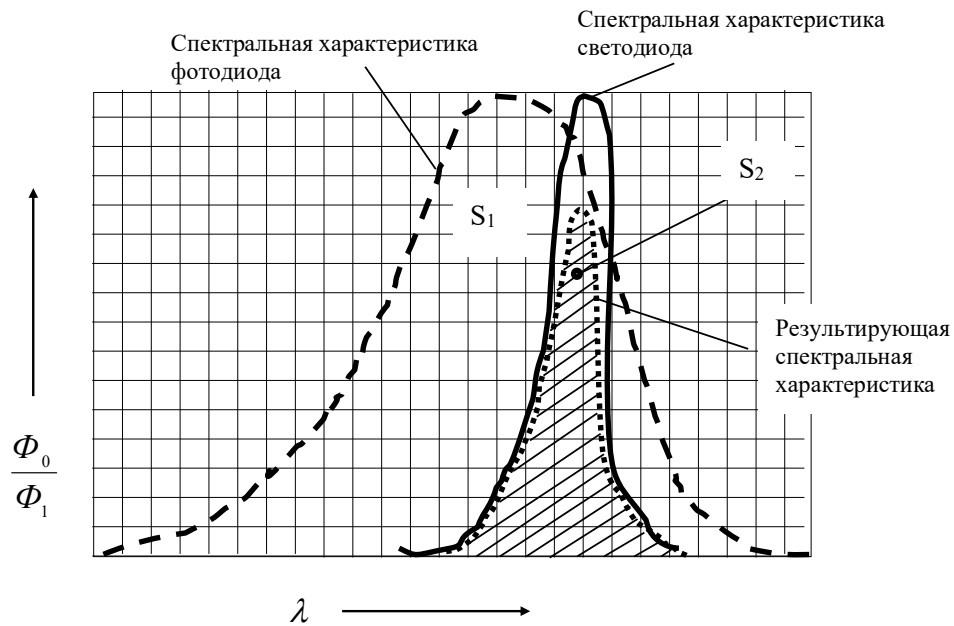


Рисунок 7.2 – Схема расчета  $\tau_2$  при согласовании спектральных характеристик светодиода и фотодиода

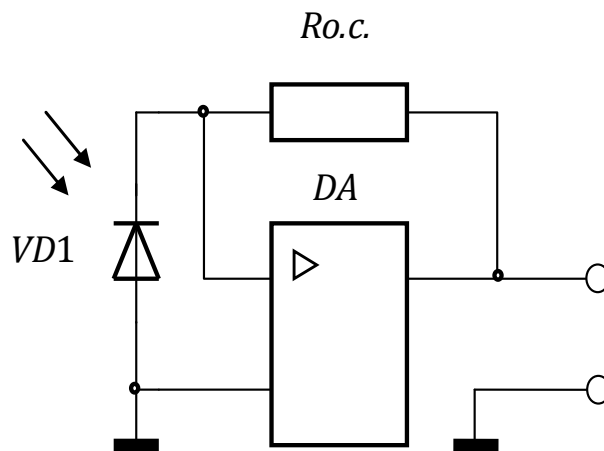


Рисунок 7.3 – Схема входного усилителя с фотодиодом

Напряжение на выходе усилителя определяется по следующей формуле:

$$U_{\text{вых}} = I_{\text{фп}} \cdot R_{o.c.},$$

где  $R_{o.c.}$  – сопротивлению резистора обратной связи.

В качестве задания студенты выполняют энергетический расчет оптической системы.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что означает термин «энергетический расчет»?
- 2 От чего зависят энергетические потери в оптической системе?
- 3 Как рассчитывается коэффициент потерь при вводе оптического излучения от полупроводникового источника в оптическую систему?
- 4 Как рассчитываются потери от несогласованности спектральных характеристик источника и приемника излучения?
- 5 Что такое «френелевские потери»?
- 6 Что такое чувствительность фотопреобразователя?
- 7 Как включается фотопреобразователь в электрическую цепь?

## **8 Практическое занятие № 8. Расчет преобразователей температуры**

При контроле параметров технологических процессов одним из важных контролируемых параметров является температура, контроль и измерения которой необходимо проводить довольно в широком диапазоне от минус 100 °С до плюс 2000 °С. Поэтому создание приборов для измерения температуры является часто встречаемой задачей. При решении данной задачи первым этапом является расчет первичного преобразователя [2, 8].

Для измерения температуры используют четыре типа преобразователей: металлические термометры сопротивления, полупроводниковые терморезисторы, термопары и пирометры.

Металлические термометры сопротивления – это платиновые термопреобразователи, которые используются для измерения температуры в диапазоне от минус 200 °С до плюс 1100 °С, и медные, используемые при температурах от минус 200 °С до плюс 200 °С. Платиновые термометры в диапазоне температур от 0 °С до плюс 650 °С используют как образцовые.

Зависимость сопротивления от температуры в диапазоне от 0 °С до плюс 650 °С имеет вид

$$R_{\Theta} = R_0(1 + A\Theta + B\Theta^2), \quad (8.1)$$

где  $R_0$  – сопротивление при 0 °С, Ом;

$$A = 3,90784 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1};$$

$$B = 5,7841 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2};$$

$\Theta$  – температура, К.

В интервале температур от 0 °С до минус 200 °С зависимость сопротивления платины имеет вид

$$R_{\Theta} = R_0 [1 + A\Theta + B\Theta^2 + C(\Theta - 100)\Theta^3], \quad (8.2)$$

где  $C = -4,482 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ .

При расчете медных терморезисторов в диапазоне температур от минус  $50 \text{ } ^\circ\text{C}$  до плюс  $180 \text{ } ^\circ\text{C}$  пользуются формулой

$$R_\Theta = R_0 (1 + \Theta \alpha), \quad (8.3)$$

где  $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;

$R_0$  – сопротивление при  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ , Ом.

Терморезисторы включаются в схемы неравновесных мостов по трехпроводной схеме (рисунок 8.1).

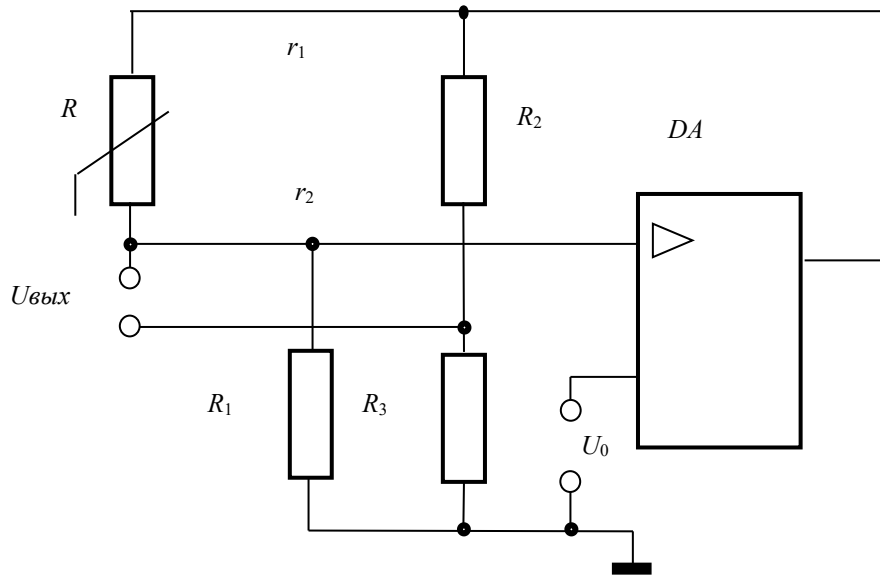


Рисунок 8.1 – Схема преобразования сопротивления в напряжение

Напряжение на входе операционного усилителя, которое является напряжением питания моста,

$$U = U_0 (R_1 + R + r_1 + r_3) / R_1. \quad (8.5)$$

Выходное напряжение моста определяется как

$$U_{\text{вых}} = U_0 \frac{R_1 + R + r_1 + r_2}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} - U_0 \frac{R_1 + r_3}{R_1}. \quad (8.6)$$

Напряжение питания  $U_0$  ограничивается значением допустимого тока, протекающего через терморезистор,

$$I = U_0 / R_1. \quad (8.7)$$

Полупроводниковые терморезисторы отличаются от металлических меньшими габаритами, значительно большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) (таблица 8.1). При этом ТКС отрицательный и уменьшается обратно пропорционально квадрату абсолютной температуры:

$$R_{\theta} = R_1 \cdot e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad (8.8)$$

где  $T$  – измеряемая температура;

$B$  – коэффициент, имеющий размерность температуры;

$R_1$  – сопротивление резистора при температуре  $T_1$ .

Таблица 8.1 – Характеристики некоторых полупроводниковых терморезисторов

Тип терморезистора	Номинальное сопротивление $R_{ном}$ , кОм	Постоянная $B$ , $10^2$ К	Диапазон рабочих температур $T_{раб}$ , °С	Коэффициент рассеяния $K$ , мВт/К	Постоянная времени $\tau$ , с
ММТ-6	10...100	20,6	-60 до +125	1,7	35
СТЗ-6	6,8...8,2	20,5...24	-90 до +125	1,6	35
КМТ-10	100...3300	36	0 до +125	–	–
СТ4-2	2,1...3,0	34,7...36,3	-60 до +125	36	–
СТ4-15	1,5...1,8	23,5...32,6	-60 до +180	36	–
СТ4-17	1,5...2,2	32,6...36	-80 до +100	2	30
КМТ-14	0,51...7500	41...70	-10 до +300	0,8	60
СТЗ-14	1,5...2,2	26...33	-60 до +125	1,1	4
СТ1-18	1,5...2200	40,5...90	-60 до +300	0,2	1
СТЗ-19	2,2...15	45	-90 до +125	0,5	3
СТЗ-25	3,3... 4,5	26...32	-100 до +125	0,08	0,4

Для линеаризации характеристики при работе с полупроводниковыми терморезисторами можно использовать нелинейную зависимость напряжения от одного из сопротивлений в резистивном делителе или неравновесном мосте. Схема такой цепи представлена на рисунке 8.2.

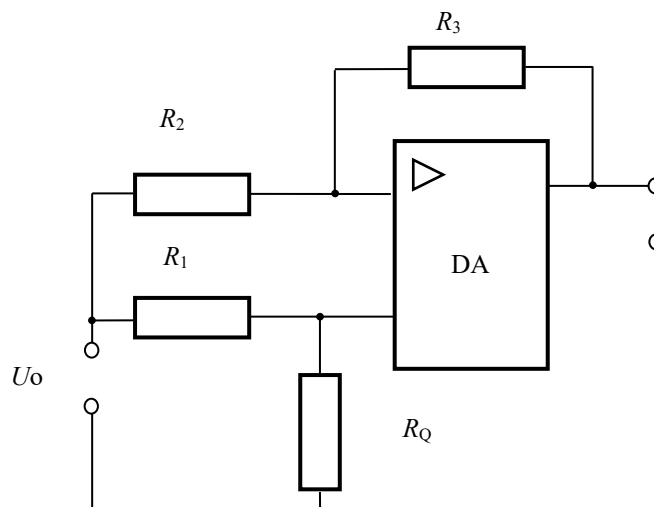


Рисунок 8.2 – Схема неравновесного моста

В данной цепи напряжение с делителя  $R_1$  и  $R$  подаётся на неинвертирующий вход усилителя. Сопротивление  $R_1$  выбирается в соответствии с выражением

$$R_1 = R_{ТП} (B - 2T_{П}) / (B + 2T_{П}), \quad (8.8)$$

где  $T_{П}$  – абсолютная температура,  $K$ ;

$R_{ТП}$  – сопротивление терморезистора, соответствующего температуре  $T_{П}$ , кОм.

Сопротивление  $R_2$  и  $R_3$  выбирается исходя из требуемой чувствительности преобразователя. Напряжение находят как

$$U_{вых} = U_0 \left[ \frac{R_{\Theta}}{R_{\Theta} + R_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) - \frac{R_3}{R_2} \right]. \quad (8.9)$$

Термоэлектрические преобразователи работают на принципе термоэлектрического эффекта. Они используются для измерения температур в диапазоне от минус 200 °С до плюс 2200 °С. Диапазон измерения зависит от материала, используемого в спаях термопары.

Термопары включают в схему прямого измерения с уравнительным резистором (рисунок 8.3).

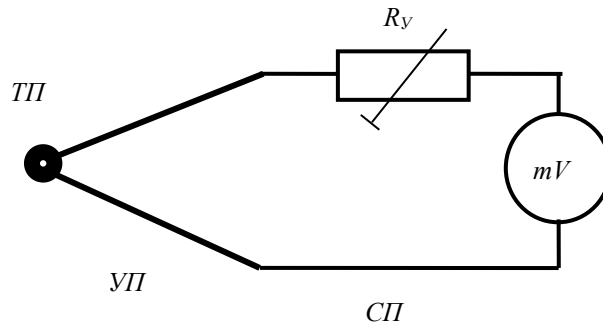


Рисунок 8.3 – Схема включения термопары

Показания милливольтметра

$$U = \frac{E_{ТП}}{R_{ВХ} + R_{mv}}, \quad (8.10)$$

где  $E_{ТП}$  – ЭДС термопары, мВ;

$R_{ВХ}$  – входное сопротивление,  $R_{ВХ} = R_{ТП} + R_{ПП} + R_y$  – сопротивления термопары, проводов, уравнительного резистора, Ом;

$R_{mv}$  – сопротивление милливольтметра, Ом.

К бесконтактным методам относятся приборы, называемые пирометрами. В основу работы пирометров излучения положены законы, связывающие температуру тел с интенсивностью их электромагнитного излучения.

Все методы оптической пирометрии основываются на законах излучения абсолютно черного тела. Так, закон Стрэфана – Больцмана связывает энергетическую светимость абсолютно черного тела с его абсолютной температурой выражением

$$R_E^* = \sigma \cdot T^4, \quad (8.11)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/ М<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>;  
 $T$  – температура тела, К.

Реальное тело, имеющее коэффициент черноты  $\varepsilon$  при той же температуре, будет обладать меньшей энергетической светимостью.

$$R_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \leq R_E^*. \quad (8.12)$$

Поскольку энергетическая яркость для источников, излучающих одинаково во всех направлениях, связана с его энергетической светимостью и испускающей способностью соотношениями

$$L_e = B_E = \frac{R_E}{\pi} ; b_V = \frac{r_V}{\pi} ; b_\lambda = \frac{r_\lambda}{\pi}, \quad (8.13)$$

где  $L_e, b_V, b_\lambda$  – энергетическая яркость и ее спектральные плотности соответственно, то

$$B_E = B_E^* \text{ и } \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = \sigma \cdot T_p^4 ; L_e = \frac{1}{\pi} \sigma \cdot T^4. \quad (8.14)$$

Тогда температура реального тела по показаниям измерений его радиационной температуры

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}. \quad (8.15)$$

Для измерения температуры используются также яркостные пирометры измерение в которых сводятся к сравнению яркости градуированного источника излучения, находящегося в пирометре, в узком диапазоне спектра излучения.

*Пример расчета яркостного фотоэлектрического пирометра.* Оптическая схема пирометра представлена на рисунке 8.4. Поток, падающий на чувствительную поверхность фотоприёмника, можно представить в виде

$$\Phi = \pi \cdot \sin^2 \alpha \cdot S_{изл} \cdot L \cdot \tau, \quad (8.16)$$

где  $\tau$  – результирующий коэффициент пропускания оптической системы;  
 $S_{изл}$  – площадь излучения поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – апертурный угол, угл. град;

$L$  – энергетическая яркость, Вт·ср<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>.

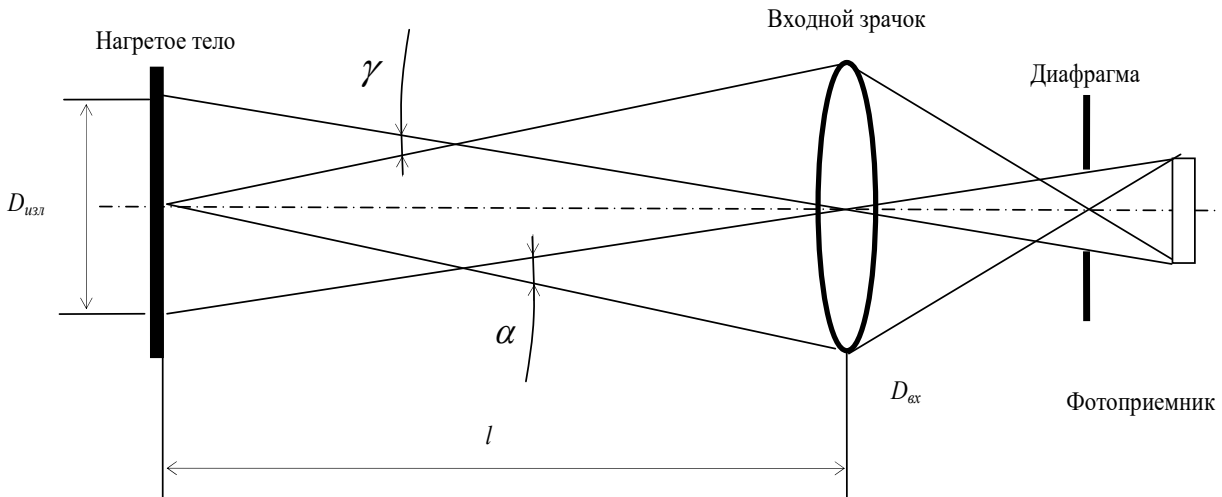


Рисунок 8.4 – Оптическая схема фотоэлектрического пирометра

Если поле ограничено углом  $2\gamma$ , то, учитывая, что при малых углах

$$\sin^2 \alpha = \left( \frac{D_{\text{вх}}}{2l} \right)^2 \quad \text{и} \quad \sin^2 \gamma = \left( \frac{D_{\text{изл}}}{2l} \right)^2 ;$$

$$\sin^2 \alpha = \left( \frac{D_{\text{вх}}}{D_{\text{изл}}} \right)^2 \cdot \sin^2 \gamma = \frac{S_{\text{вх}}}{S_{\text{изл}}} \sin^2 \gamma . \quad (8.17)$$

Найдем величину потока:

$$\Phi = \pi \cdot \sin^2 \gamma \cdot S_{\text{вх}} \cdot L \cdot \tau = \sin^2 \gamma \cdot S_{\text{вх}} \cdot \tau \cdot \sigma \cdot T^4 , \quad (8.18)$$

где  $S_{\text{изл}}$  – площадь, ограниченная полем зрения оптической системы, м<sup>2</sup>.

Ток фотоприемника находят исходя из чувствительности выбранного фотоприёмника. Выбор фотоприемника основан на его спектральных характеристиках. Ток фотодиода вычисляется по следующей зависимости:

$$I_{\Phi} = S \cdot \Phi , \quad (8.19)$$

где  $S$  – чувствительность фотодиода, А/Вт;

$\Phi$  – величина потока излучения, Вт.

В качестве задания студентам предлагается провести расчет и построить функцию преобразования одного из рассмотренных выше термопреобразователей.

Для закрепления материала необходимо ответить на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1 Какие типы преобразователей температуры Вы знаете?

2 На чем основан принцип работы полупроводниковых терморезисторов?

- 3 На чем основан принцип работы металлических термопреобразователей?
- 4 Из какого металла изготавливают чувствительный элемент металлического термометра сопротивления?
- 5 Какой преобразователь температуры используется как эталонный?
- 6 Какие типы бесконтактных преобразователей температуры Вы знаете?
- 7 Какие электрические цепи используются для преобразования сопротивления термопреобразователя в напряжение?
- 8 Принцип работы термоэлектрического преобразователя температуры.

## Список литературы

- 1 **Рачков, М. Ю.** Технические измерения и приборы : учебник и практикум / М. Ю. Рачков. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2018. – 151 с.
- 2 **Рачков, М. Ю.** Физические основы измерений / М. Ю. Рачков. – М. : Юрайт, 2019. – 146 с.
- 3 **Миронов, Э. Г.** Метрология и технические измерения : учеб. пособие / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – М. : КНОРУС, 2016. – 422 с.
- 4 **Шишмарев, В. Ю.** Технические измерения и приборы : учебник / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2010. – 384 с.
- 5 **Зак, Е. А.** Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
- 6 **Фукс-Рабинович, Л. И.** Оптико-электронные приборы / Л. И. Фукс-Рабинович, М. В. Епифанов. – Л. : Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1979. – 368 с.
- 7 **Левшина, Е. С.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 390 с.
- 8 **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 9 **Березин, С. Я.** Измерительные преобразователи и электроды. Биомедицинские датчики : учебник / С. Я. Березин, В. А. Устюжанин. – М. : Юрайт, 2026. – 267 с.
- 10 Информационно-измерительная техника и электроника. Преобразователи неэлектрических величин : учебник / под общ. ред. О. А. Агеева, В. В. Петрова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 158 с.
- 11 **Сафиуллин, Р. К.** Основы автоматики и автоматизации процессов : учебник / Р. К. Сафиуллин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2026. – 146 с.