



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный  
технический университет**

---

---

**Кафедра «Конструирование и производство приборов»**

# **ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ**

## **Лабораторный практикум**

**Минск  
БНТУ  
2017**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

## ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ

Лабораторный практикум  
для студентов специальности 1-38 01 01  
«Механические и электромеханические приборы и аппараты»

Минск  
БНТУ  
2017

УДК 681.2-2(076.5)  
ББК 34.9я7  
Э45

Составители:

*А. А. Новиков, В. Л. Габец*

Рецензенты:

*В. В. Саранцев, О. А. Прохоров*

**Элементы** приборов : лабораторный практикум для студентов  
Э45 специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические  
приборы и аппараты» / сост. : А. А. Новиков, В. Л. Габец. – Минск :  
БНТУ, 2017. – 135 с.

ISBN 978-985-550-592-2.

Лабораторный практикум предназначен для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты», специализации 1-38 01 01 04 «Контрольно-измерительные приборы и системы», 1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппаратура» и включает в себя теоретические основы по дисциплине «Элементы приборов», методику выполнения лабораторных работ, требования к оформлению работы, контрольные вопросы.

УДК 681.2-2(076.5)  
ББК 34.9я7

ISBN 978-985-550-592-2

© Белорусский национальный  
технический университет, 2017

## Лабораторная работа № 11\*

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОПЛАВКОВОГО ТОПЛИВОМЕРА

#### Цель работы

1. Изучить устройство поплавкового топливомера.
2. Составить и вычертить структурную и кинематическую схемы прибора.
3. Определить назначение всех деталей, входящих в конструкцию прибора.
4. Составить аналитическую функцию преобразования и определить источники погрешностей.

#### Инструменты и принадлежности

1. Узел топливомера.
2. Отвертка.

#### Общие сведения

**Топливомерами** называются измерительные устройства, предназначенные для измерения объемного или весового количества жидкого топлива.

В большинстве случаев определение количества топлива сводится к измерению его уровня, т. е. высоты столба жидкости, при этом шкалы указателей топливомеров градуируются в единицах объема (литрах) или в килограммах.

Непосредственное измерение объема (веса) топлива осуществляется крайне редко, так как на результат измерения оказывают влияние размеры, форма, а также количество топливных баков (авиация), поэтому широко применяются косвенные методы измерения, в которых объем (вес) топлива функционально связан с какой-либо легко

---

\* Лабораторные работы № 1–8 содержатся в сборнике «Элементы приборов» (сост. : А. А. Новиков, П. О. Корзун), выпущенном в 2014 г.

определяемой величиной, которая впоследствии преобразуется и подается на отображающее устройство.

Большинство методов измерения количества топлива сводится к измерению его уровня. Количество топлива  $V$  (в единицах объема) и его уровень  $h$  связаны между собой функциональной зависимостью, определяемой формой топливного бака. Количество топлива в баке можно измерить следующими методами:

- *весовым*, – непосредственным взвешиванием бака с топливом с помощью тензодатчиков, которые устанавливаются в местах крепления бака;

- *гидростатическим*, основанным на зависимости гидростатического давления топлива от его уровня;

- *поплавковым*, который заключается в измерении линейного перемещения плавающего на поверхности топлива поплавка относительно вертикальной направляющей или углового перемещения, связанного с поплавком рычага;

- *акустическим*, основанным на свойстве ультразвуковых колебаний отражаться от границы раздела двух сред. Измерение уровня топлива в баке может осуществляться путем локации сверху или снизу;

- *емкостным*, основанным на зависимости емкости конденсатора, расположенного в топливном баке, от уровня топлива. Емкость изменяется в связи с тем, что диэлектрическая проницаемость отличается от диэлектрической проницаемости воздуха;

- *индуктивным*, основанным на зависимости индуктивности катушки, расположенной в баке, от уровня топлива. Индуктивность изменяется вследствие изменения электрических потерь в жидкости. Эти потери ощутимы в электропроводящих жидкостях, для которых и применим метод;

- *резисторным*, основанным на зависимости активного сопротивления резистора, расположенного в топливном баке, от уровня топлива. Сопротивление изменяется вследствие шунтирования его топливом. Этот метод пригоден для измерения уровня электропроводящих жидкостей;

- *радиоволновым* (радиоинтерференционным), основанным на зависимости от уровня жидкости положения узлов стоячей электромагнитной волны, возникающей в коаксиальной линии при сложении падающей и отраженной от измеряемого уровня волны;

– *радиоизотопным*. Этот метод основан на измерении интенсивности излучения радиоизотопов при их прохождении через слой жидкости, уровень которой измеряется.

Наибольшее распространение получили следующие типы топливомеров:

– *поплавковые*, основанные на измерении уровня (объема) топлива с помощью плавающего на поверхности поплавка. Линейное перемещение поплавка или угловое перемещение связанного с ним рычага измеряется и позволяет судить о количестве топлива, находящегося в баке;

– *емкостные*, основанные на измерении уровня (объема) топлива с помощью специального конденсатора, емкость которого функционально связана с уровнем топлива в баке;

– *манометрические*, основанные на измерении давления (веса) столба топлива с помощью манометра.

Поплавковые и емкостные топливомеры измеряют объемное количество топлива, а манометрические – весовое. Так как количество топлива принято выражать в объемных единицах (литрах), то показания манометрических топливомеров правильны только для топлива определенного удельного веса.

Несмотря на то, что большинство топливомеров используют одни и те же методы измерения, между ними существуют принципиальные различия, вызванные следующими особенностями:

– топливные баки имеют разные размеры, что накладывает ограничения на используемые датчики уровня;

– топливные баки могут иметь весьма сложную форму, что вынуждает использовать профилированные датчики уровня;

– под действием сил и ускорений происходит перераспределение топлива в баке, что приводит к появлению погрешности измерения;

– для летательных аппаратов с несколькими топливными баками необходимо осуществлять центровку перекачки топлива из одного бака в другой для стабилизации центра масс летательного аппарата.

Поплавковый топливомер конструктивно состоит из двух частей (рис. 11.1):

– из датчика, расположенного в топливном баке;

– указателя, который размещен на приборной панели или проецируется на многофункциональном дисплее.

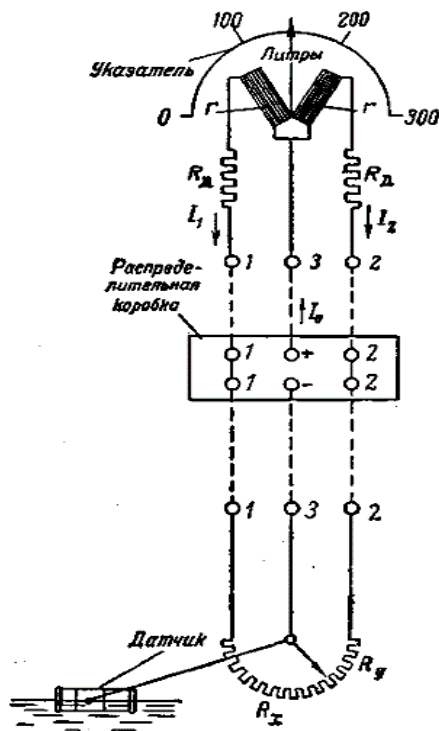


Рис. 11.1. Электрическая схема топливомера:

$R_x, R_y$  – сопротивления плеч потенциометра;  $R_д$  – добавочные сопротивления;  
 $r$  – сопротивления рамок логометра;  $I_1, I_2$  – токи в рамках логометра;  
 $I_0$  – общий потребляемый ток

Датчик (рис. 11.2) состоит из поплавка 1, погруженного в бак, и электрического преобразователя перемещений, включающего ползунок 2, связанный с поплавком рычажной передачей 5, и потенциометр 3. При перемещении поплавка ползунок скользит по потенциометру и занимает положение, соответствующее уровню топлива в баке. Чтобы исключить возможность проникновения паров топлива в камеру потенциометра, промежуточный рычаг, передающий перемещение поплавка ползунку потенциометра, пропущен через эластичный сильфон 4, обеспечивающий полную герметичность и не препятствующий качанию рычага.

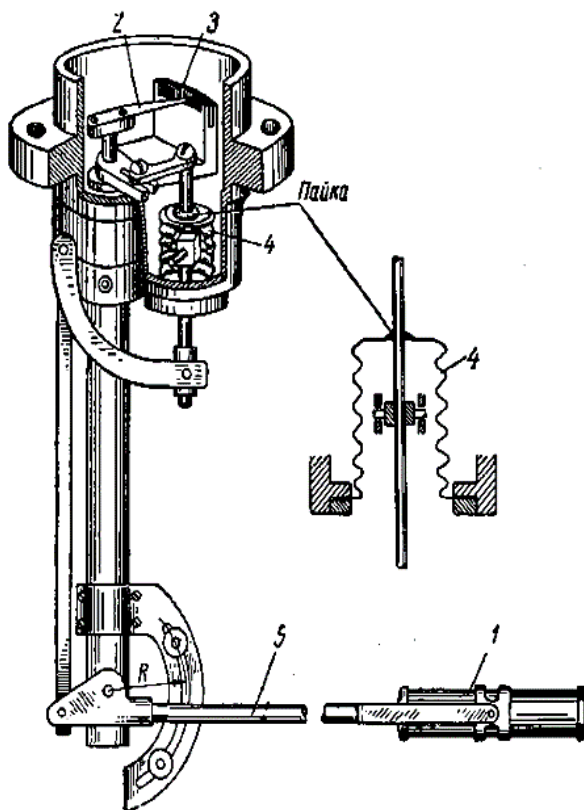


Рис. 11.2. Датчик электрического топливомера с потенциметрической дистанционной передачей:

- 1 – поплавок; 2 – ползунок; 3 – потенциметр;  
4 – сильфон; 5 – рычаг поплавка

В качестве указателя применяется магнитоэлектрический логометр с подковообразным магнитом (рис. 11.3). Подвижная система логометра выполнена в виде двух рамок, расположенных под некоторым углом.



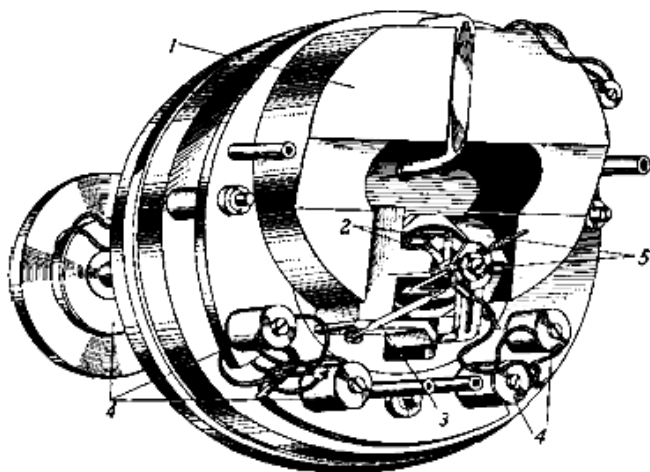


Рис. 11.3. Указатель топливомера (со снятой шкалой):  
1 – магнит; 2 – подвижные рамки; 3 – стрелка; 4 – катушки сопротивления;  
5 – полюсные наконечники

Поплавковым топливомерам свойственны методические и инструментальные погрешности.

К методическим погрешностям относятся:

– погрешности, обусловленные изменением положения топлива в баке при продольных и поперечных наклонах самолета и при движении самолета с продольными и поперечными ускорениями;

– погрешности, вызванные влиянием температуры на уровень топлива (в соответствии с коэффициентом объемного расширения топлива).

Инструментальные погрешности топливомера аналогичны погрешностям других электромеханических измерительных устройств. Они обусловлены несовершенством механических и электрических элементов, наличием сил трения, люфтов, влиянием температуры на механические, электрические и магнитные свойства деталей и узлов, обусловленные приближениями, допущенными при проектировании измерительных устройств, изменением напряжения источника питания и т. п.

Методические погрешности в поплавковых топливомерах не компенсируются.

Температурные инструментальные погрешности топливомеров компенсируются подбором параметров схемы.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить у преподавателя датчик электрического топливомера с потенциометрической дистанционной передачей.

2. Определить принцип действия прибора, установив физический процесс, на основе которого измеряемая величина преобразуется в перемещение.

3. Установить все преобразования, которые происходят в приборе от первичного преобразователя до показывающей или регистрирующей части.

4. В конструкции прибора выделить вспомогательные элементы, которые могут выполнять функции регулирования, компенсации погрешностей, демпфирования, арретирования, ограничения и изменения пределов измерения, проверки работоспособности и др.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Функция преобразования изучаемого узла.
5. Кинематическая схема изучаемого узла.
6. Источники погрешностей изучаемого узла.
7. Выводы по проделанной работе.

### **Список литературы**

1. Обозначения условные графические в схемах. Элементы кинематики : ГОСТ 2.770–68.

2. Браславский, Д. А. Расчет и конструкция авиационных приборов / Д. А. Браславский, С. С. Логунов, Д. С. Пельпор. – Москва, 1954. – 584 с.

## Лабораторная работа № 12

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ С РЕЗИСТИВНЫМИ ПЕРВИЧНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

#### Цель работы

1. Изучить принцип действия резистивных первичных измерительных преобразователей.
2. Изучить электрические схемы промежуточных преобразователей, работающих с резистивными первичными измерительными преобразователями.

**Инструменты и принадлежности** – лабораторный стенд.

#### Общие сведения

Резистивные первичные измерительные преобразователи, далее – резистивные преобразователи, служат для преобразования изменений неэлектрических величин в изменение электрических параметров. Широкое распространение этих элементов приборов обусловлено главным образом следующими причинами:

- простотой конструкции преобразователя;
- простотой электрических схем, реагирующих на изменение активного сопротивления. Выходной сигнал некоторых преобразователей можно без усиления подавать на показывающее, регистрирующее или другое устройство;
- возможностью использовать для преобразования различных неэлектрических величин в электрические в приборах точной механики.

Принцип действия резистивных преобразователей основан на использовании зависимости активного сопротивления  $R$  от длины проводника  $l$ , площади его поперечного сечения  $A$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$ , которые изменяются под внешним воздействием, подлежащим измерению (деформация, давление, усилие, температура, влажность, скорость потока газа, освещенность и др.):

$$R = \rho \frac{l}{A}.$$

Резистивные преобразователи изготавливаются как из металлов (тензорезисторы, реохордные, реостатные, терморезисторы, термоанемометры), так и полупроводников (тензорезисторы, терморезисторы, фоторезисторы, магниторезисторы).

В настоящей работе используется реостатный измерительный преобразователь (рис. 12.1), в котором подвижный контакт 3 перемещается относительно каркаса 2 реостата, тем самым изменяя активное сопротивление на участке электрической цепи 1. Это перемещение может быть связано с положением частей машин, станков, уровня жидкости, мембраны под действием давления жидкости, инерционной массы под действием ускорения и других механических параметров.

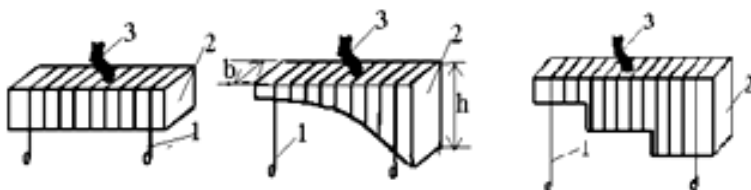


Рис. 12.1. Виды каркасов реостатного измерительного преобразователя:  
1 – провод; 2 – каркас; 3 – щетка

Каркасом реостата служат диэлектрики (гетинакс, пластмассы, керамика и др.), изготовленные в виде пластины, цилиндра, тора и более сложных по форме деталей. Провод должен быть изолирован эмалью или оксидной пленкой. После намотки провода на каркас в местах контакта щетки движка изоляция счищается.

Наилучшим материалом для обмоточной проволоки служит сплав платины и иридия (90 % Pt, 10 % Ir). Добавка иридия к платине увеличивает удельное электрическое сопротивление ( $\rho = 0,23 \cdot 10^{-6}$  Ом/м), понижает температурный коэффициент электрического сопротивления, повышает твердость, прочность, кислотоупорность. Недостаток этого сплава – высокая стоимость.

Более часто в реостатных преобразователях используются нихром, константан и фехраль. При высоких температурах используются нихром и фехраль.

Щетки выполняются в виде двух-трех проволочек из сплава платины с иридием или платины с бериллием либо в виде плоских

пружинящих пластин из серебра, платины и фосфористой бронзы. Качество контакта между щеткой и обмоткой зависит от контактного давления, изменяющегося от 0,03–0,005 (для проволочек) до 0,05–0,1 Н (для пластин) в зависимости от условий работы преобразователя и материалов контакта и обмотки.

В реостатных измерительных преобразователях изменение сопротивления при перемещении щетки происходит скачкообразно со ступенями, соответствующими сопротивлению одного витка. В этом случае максимальная погрешность преобразования определяется отношением сопротивления одного витка к полному сопротивлению обмотки реостата. Для уменьшения погрешности необходимо уменьшать диаметр провода и увеличивать число витков. Одновременно при этом уменьшается сопротивление перемещению щетки.



Рис. 12.2. Реохордный измерительный преобразователь

Если необходимо исключить скачкообразность изменения сопротивления, то применяются реохордные измерительные преобразователи (рис. 12.2), у которых щетки скользят вдоль провода, но у таких преобразователей значительно меньше чувствительность.

Если для реохордного измерительного преобразователя чувствительность  $S$  определяется как отношение выходного параметра

$$U_{\text{вых}} = R = \frac{\rho l}{A},$$

к входному  $U_{\text{вх}} = l$ , то  $S = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\rho}{A}$ .

Для реостатного измерительного преобразователя

$$R = n\rho \frac{\pi d}{A} = \frac{l}{D} \rho \frac{\pi d}{A},$$

где  $n$  – число витков провода реостата;

$d$  – диаметр провода;

$D$  – диаметр витка провода.

Тогда

$$S_2 = \frac{\pi d}{D} S_1.$$

Увеличение чувствительности за счет диаметра  $d$  приводит к увеличению скачков сопротивления преобразователя и росту габаритных размеров. Уменьшение  $D$  связано со сложностью получения провода малого диаметра.

Реостатные измерительные преобразователи широко используются в приборах для измерения уровня жидкости, давления в гидро- и пневмосистемах, ускорения и других механических величин. При этом учитываются такие преимущества:

- простота механической части конструкции;
- возможность получения значительных выходных сигналов, позволяющих без применения усилителей подключать показывающие и регистрирующие устройства;
- возможность передачи информации от измерительных преобразователей к показывающему устройству на значительные расстояния – до 200–300 м.

Недостатки:

- наличие скользящего контакта;
- значительные сопротивления перемещению щетки;
- скачкообразное изменение электрического сопротивления.

Резистивные измерительные преобразователи относятся к группе параметрических измерительных преобразователей, в которых под действием измеряемой механической величины изменяется активное сопротивление.

В измерительную схему с параметрическими измерительными преобразователями необходимо включать источник питания, усилитель (при необходимости), регистрирующее устройство и другие элементы.

Наиболее простые измерительные схемы с резистивными измерительными преобразователями показаны на рис. 12.3.

Схемы (рис. 12.3, *a*, *б*) включают источник питания постоянного тока, резистивные измерительные преобразователи и показывающие приборы (амперметр и вольтметр), шкалы которых проградуированы в единицах измеряемой величины. Такие схемы применимы при значительном изменении сопротивления.

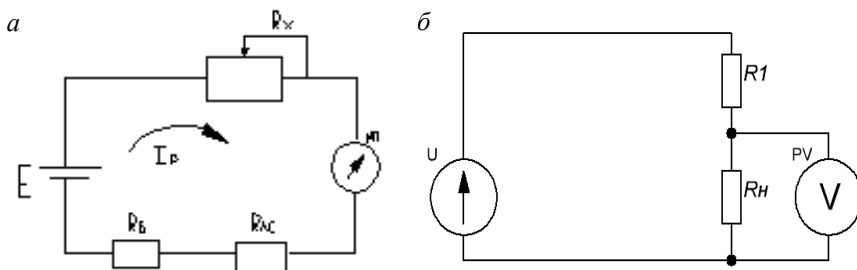


Рис. 12.3. Измерительные схемы резистивных измерительных преобразователей:  
 а – делитель тока; б – делитель напряжения

Величина напряжения

$$\Delta U = \frac{IS\varepsilon R_{\text{п}}}{I + \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{д}}}}$$

где  $I = \frac{U}{R_1 + R_{\text{н}}}$ ;

$S$  – коэффициент чувствительности:

$$S = \frac{\Delta R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} \frac{1}{\varepsilon}$$

$\Delta R_{\text{н}}$  – изменение сопротивления  $R_{\text{н}}$ ;

$\varepsilon$  – относительное изменение длины рабочей части резистора.

Основной недостаток приведенных схем состоит в том, что показания прибора зависят от напряжения источника питания  $U$ .

Для того чтобы устранить зависимость показаний от напряжения питания в измерительных схемах, применяют логометры (греч. *logos* – слово, отношение). В логометрах положение стрелки указателя зависит от отношения токов, протекающих по двум катушкам подвижной части.

Логометры бывают магнитоэлектрической, ферродинамической, электродинамической, электромагнитной и других систем. Наиболее часто применяются логометры магнитоэлектрической системы (рис. 12.4).

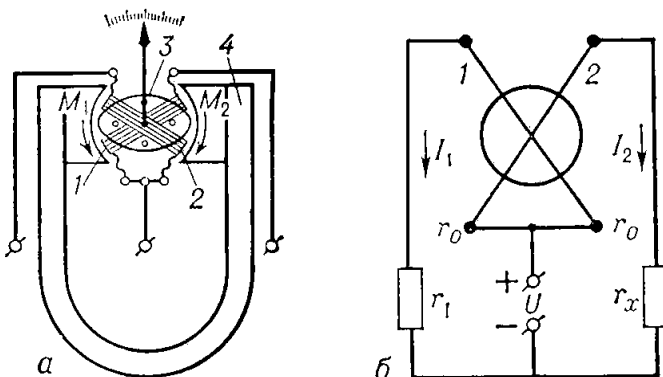


Рис. 12.4. Логометр: структурная (а) и электрическая схемы (б)

На оси стрелки 3 под углом 30–90° закреплены две катушки 1 и 2. Неподвижная часть прибора – постоянный магнит 4 с полюсными наконечниками, имеющими расточку специальной формы, за счет чего в воздушном зазоре между наконечниками и подвижной частью создается неравномерное магнитное поле.

Направления токов в катушках противоположны, что создает вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$  от взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и электромагнитных полей катушек также противоположных направлений:

$$M_1 = B_1 I_1 \omega_1 A_1;$$

$$M_2 = B_2 I_2 \omega_2 A_2,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – магнитные индукции в зазоре;

$I_1$  и  $I_2$  – токи катушек;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  – число витков катушек;

$A_1$  и  $A_2$  – площади катушек.

Поворот подвижной части произойдет в сторону действия большего момента до той поры, пока вращающие моменты не выравняются за счет переменности магнитной индукции в зазоре между подвижной и неподвижной частями.



Тогда  $M_1 = M_2$ :

$$B_1 I_1 \omega_1 A_1 = B_2 I_2 \omega_2 A_2;$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2 \omega_2 A_2}{B_1 \omega_1 A_1}.$$

Так как  $A_1$  и  $A_2$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – постоянные характеристики, а отношение  $B_2/B_1$  определяется положением подвижной части со стрелкой – углом  $\alpha$ , то

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right),$$

т. е. показание прибора зависит от отношения токов, протекающих по обмоткам катушек, и не зависит от напряжения питания.

На рис. 12.5 показана схема включения. Резистивный измерительный преобразователь включен в мостовую схему, состоящую из четырех плеч  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R'_n$  и  $R''_n$ , логометра, источника питания и добавочного сопротивления. Эта схема дает высокую чувствительность и удобна при использовании реохордных, реостатных, тензометрических, фотоэлектрических и других преобразователей, включенных дифференциально.

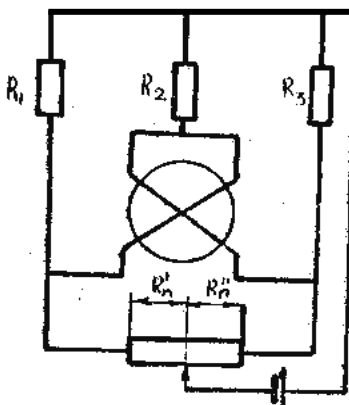


Рис. 12.5. Мостовая схема включения резистивного измерительного преобразователя и логометра

## Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рис. 12.6) состоит из поплавкового датчика *1* электрического топливомера, смонтированного на основании, показывающего прибора *2*, установленного в корпусе, и шкалы *3* с фиксирующим устройством для отсчета положения поплавка *7*.



Рис. 12.6. Фотография общего вида лабораторного стенда:

*1* – поплавковый датчик электрического топливомера; *2* – показывающий прибор; *3* – отсчетная шкала; *4* – тумблер переключения режимов; *5* – гнезда для снятия показаний в узловых точках; *6* – сетевой тумблер; *7* – поплавок

Поплавковый датчик *1* электрического топливомера включает в себя поплавок *7* и потенциометр, который установлен в герметичном корпусе. Ползунок потенциометра связан с поплавком *7* рычажной передачей. При перемещении поплавка ползунок скользит по потенциометру и занимает положение, соответствующее уровню топлива в баке.

В качестве показывающего прибора *2* применен магнитоэлектрический логометр с подковообразным магнитом (рис. 12.7). Подвижная система логометра выполнена в виде двух рамок, расположенных под некоторым углом.

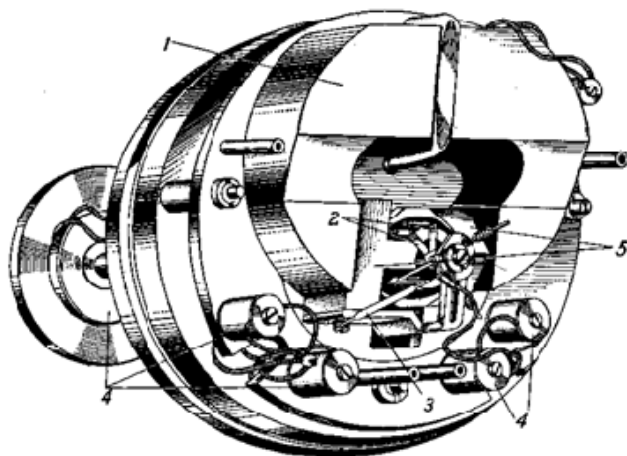


Рис. 12.7. Показывающий прибор топливомера (со снятой шкалой):  
1 – магнит; 2 – подвижные рамки; 3 – стрелка; 4 – катушки сопротивления;  
5 – полюсные наконечники

Для увеличения угла шкалы (с целью повышения точности отсчета показаний) полюсным наконечникам 5 логометра придана специальная форма, которая позволяет получать размах шкалы прибора, равный  $180^\circ$ .

Для уменьшения магнитного влияния указателя на компас и другие приборы, расположенные вблизи, а также для устранения влияния на указатель внешнего магнитного поля на его корпус надевается железный экран. Шкала логометра градуирована непосредственно в литрах.

### Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к работе.
2. Лабораторный стенд и вольтметр подключить к сети 220 В.
3. Включить питание у вольтметра.
4. Тумблер 4 переключения режимов переключить в верхнее положение.
5. С помощью кабеля подключить вольтметр к паре гнезд 1 и 2 (гнезда для снятия показаний в узловых точках 5, см. рис. 12.6).

6. Снять показания с вольтметра при перемещении поплавка 7 через каждые 5 мм.

7. Подключить вольтметр к паре 1 и 5 гнезд. При перемещении поплавка 7 снять показания с вольтметра через каждые 5 мм.

8. Построить зависимость  $U = f(S)$ .

9. Тумблер 4 переключения режимов переключить в нижнее положение.

10. Повторить пункты 5–7, сняв показания сопротивления с обмотки потенциометра.

11. Построить зависимость  $R = f(S)$ .

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблица с полученными результатами измерений.
4. График результатов измерений.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Список литературы**

1. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е. П. Осадчего. – Москва : Машиностроение, 1979. – С. 275–284.

2. Браславский, Д. А. Расчет и конструкция авиационных приборов / Д. А. Браславский, С. С. Логунов, Д. С. Пельпор. – Москва, 1954. – 584 с.

## Лабораторная работа № 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

#### Цель работы

1. Изучить принцип действия тензорезисторов.
2. Изучить особенности мостовых схем, работающих с тензорезисторами.
3. Изучить установку для исследования деформаций, снять экспериментальные данные.

#### Инструменты и принадлежности

1. Экспериментальная установка, содержащая тензометрический узел.
2. Осциллограф.

#### Общие сведения

В тензорезисторах при деформации происходит изменение длины, поперечного сечения и удельного сопротивления, что влияет на электрическое сопротивление. Тензорезистор может быть наклеен на исследуемую деталь машины, упругий элемент прибора, детали строительной конструкции и т. д.

Тензорезисторы выполняются в виде проволочной решетки, сплюснутой проволочной спирали, травленной фольговой решетки, спирали на резиновой нити, латексного капилляра с ртутью и полупроводниковых кристаллов пластинчатой или нитевидной формы. Считается, что тензорезистор, соединенный с исследуемой деталью, повторяет деформации растяжения или сжатия.

Если проволока подвержена действию напряжения  $\delta$ , то это напряжение вызывает приращение сопротивления:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d(Pl/t)}{d\delta} = \frac{l}{F} \frac{dP}{d\delta} - \rho \frac{dl}{d\delta} - \frac{\rho l}{F^2} \frac{dF}{d\delta}$$

или, если записать относительно исходного сопротивления  $R$ :

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\delta} = \frac{l}{\rho} \frac{d\rho}{d\sigma} + \frac{1}{l} \frac{dl}{d\sigma} - \frac{1}{F} \frac{dF}{d\sigma}.$$

Конечное изменение напряжения вызывает изменение сопротивления пропорционально изменениям удельного сопротивления  $\Delta\rho/\rho$ , длины  $\Delta l/l$  и площади (диаметра) и  $\Delta F/F = 2\Delta d/d$  с учетом коэффициента Пуассона  $\Delta d/d = (-\Delta l/l)\mu$ .

Тогда

$$\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta l/l(1 + 2\mu).$$

Если относительное изменение сопротивления разделить на относительное изменение длины в направлении измерения, то получим тензочувствительность  $S$ :

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} + 1 + 2\mu.$$

Для металлов  $\mu = 0,3$ , тогда

$$S = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l} + 1,6.$$

Если в качестве материала тензорезистора применяется высокоомная проволока, то  $S = 1,9-2,9$ .

### ***Проволочные тензорезисторы***

Проволока в виде решетки или сплюснутой спирали находится между двумя слоями бумаги или пленки (рис. 13.1). Материал проволоки выбирается с учетом следующих требований:

- удельное электрическое сопротивление должно быть высоким, что позволит создать малогабаритные и высокоомные ПИП;
- температурный коэффициент должен быть как можно малым, чтобы температурное влияние среды меньше сказывалось на точности измерения и для упрощения компенсации температурных погрешностей;

- зависимость между деформацией и сопротивлением должна быть линейной;
- температурный коэффициент линейного расширения должен быть близким или равным коэффициенту материала исследуемой детали;
- термоЭДС в паре с медью должна быть возможно меньшей, если схема питается постоянным током, так как концы проволочного резистора привариваются к медным выводным проводникам;
- показатели механической прочности и химической стойкости должны быть высокими;
- пластичность должна быть достаточной для вытягивания проволоки до микронных размеров.

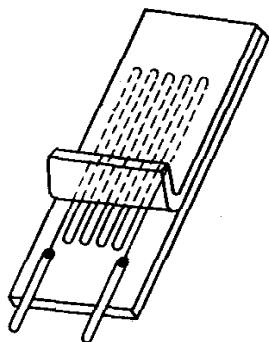


Рис. 13.1. Тензорезистор

Диаметр проволоки для ПИП может быть в пределах 0,01–0,05 мм (иногда при малой базе 0,002–0,006 мм), база 3–100 мм. Номинальное сопротивление 20–500 Ом.

Температурный диапазон для тензоизмерительных преобразователей на бумажной основе – до 325 К, если основа стеклотканевая или органосиликатная, то рабочий диапазон температур – до 725 К.

Основой для тензорезисторов служат бумага, пленка, стеклоткань, стальная полоса толщиной 0,15 мм. Для присоединения к исследуемой детали используют монтажные клеи БФ2, БФ4, ВЛ-4, ВЛ-931, циакрин, кабринольный, полимерный клей, цементы, лаки, эпоксидные клеи.

Тензорезисторы на стальной полосе привариваются к детали электроконтактной сваркой.

### ***Фольговые тензорезисторы***

Фольговые тензорезисторы (рис. 13.2) имеют решетку из тонколистовой константановой фольги толщиной 2–10 мкм на бумажной основе или из синтетической смолы. Толщина бумажной основы 0,08–0,1 мм.

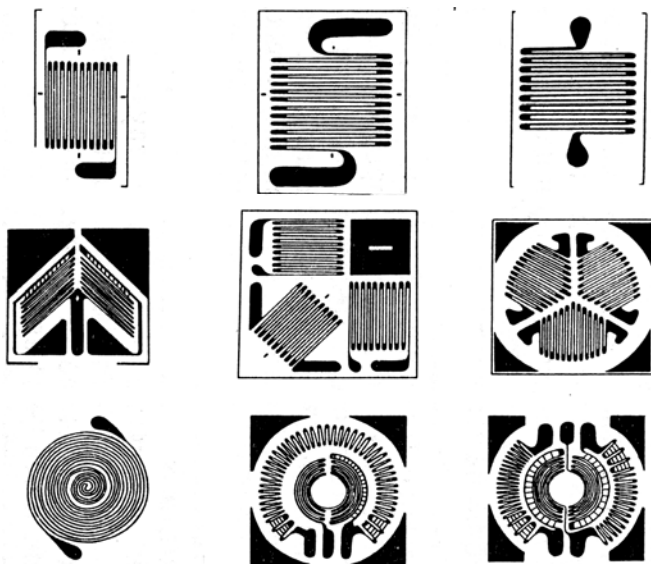


Рис. 13.2. Конструкции фольговых тензорезисторов

Главные преимущества фольговых тензорезисторов по сравнению с проволочными следующие:

- лучшие эксплуатационные и метрологические характеристики – большая площадь сцепления с поверхностью детали и рабочий ток, лучшая теплоотдача, меньшая чувствительность в поперечном направлении, большой выходной сигнал, большая гибкость;

- лучшие технологические характеристики – уменьшение трудоемкости изготовления за счет применения фотографических процессов химического травления одновременно до 200 изображений решеток, автоматизации многих операций обработки и возможность изготовления решеток любой сложной формы (см. рис. 13.2).

### ***Полупроводниковые тензорезисторы***

Материалом для полупроводниковых тензорезисторов (рис. 13.3) служат германий, кремний и др. Чувствительный элемент выполняется в виде монокристалла толщиной 0,02–0,05 мм, шириной 0,3–0,5 мм и длиной 2–12 мм, а также диаметром в сотые и десятые доли миллиметра.



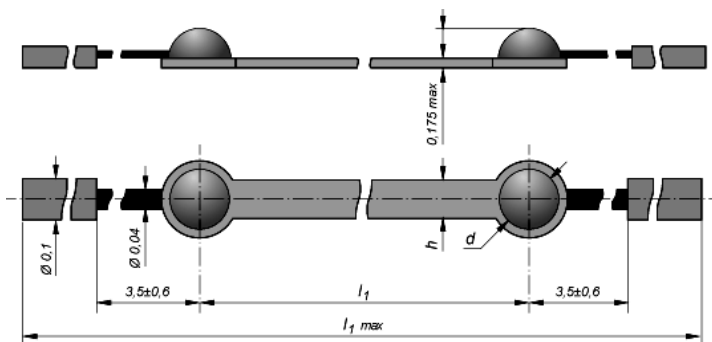


Рис. 13.3. Полупроводниковый тензорезистор

Для кремниевых тензорезисторов номинальная тензочувствительность составляет  $+100\dots+200$  или  $-100$ , номинальное сопротивление  $90\text{--}750$  Ом, база  $1,4\text{--}6,4$  мм при длине  $2\text{--}7$  мм, ширине  $0,3$  мм.

Изменение удельного сопротивления полупроводниковых элементов при деформации в десятки раз больше по сравнению с проводниковыми, что определяет высокую чувствительность преобразователей с большим выходным сигналом. Однако следует учитывать, что для полупроводниковых тензорезисторов характерна большая температурная зависимость сопротивления и чувствительности. При этом для партии преобразователей имеет место большое рассеивание чувствительности в пределах  $\pm 10\%$  и сопротивления  $\pm 1\%$ .

В связи с анизотропией тензочувствительности характеристик в продольном и поперечном направлениях при конструировании и изготовлении преобразователей необходимо обеспечивать совпадение оси монокристалла с направлением измеряемой деформации.

Допустимые деформации для полупроводниковых тензорезисторов значительно меньше проводниковых, что учитывается при конструировании упругих элементов.

Крепление кристаллов на упругом элементе производится цементом и клеями. В процессе сушки и полимеризации возникают деформации, которые воспринимаются кристаллом и изменяют его показатели. Этот процесс происходит также и во время работы тензорезистора. В этом случае высокая чувствительность тензорезистора позволяет обнаруживать самые незначительные напряжения, возникающие в местах присоединения кристалла, что создает трудности в выполнении крепления.

В связи с указанными выше недостатками полупроводниковые тензорезисторы следует применять в тех случаях, когда решающими будут:

- высокая чувствительность;
- малые размеры.

### Измерительные схемы тензорезисторов

На рис. 13.4 показаны примеры упругих элементов первичных измерительных преобразователей с установленными на них тензорезисторами. Включение рабочих тензорезисторов в измерительную схему в основном возможно по трем вариантам: в одно плечо моста, два и четыре. При включении в несколько плеч учитывается направление деформаций. Если деформации имеют один знак, то резисторы включаются в противоположные плечи моста, что позволяет получить максимальный разбаланс моста, а при разных знаках деформации – в соседние.

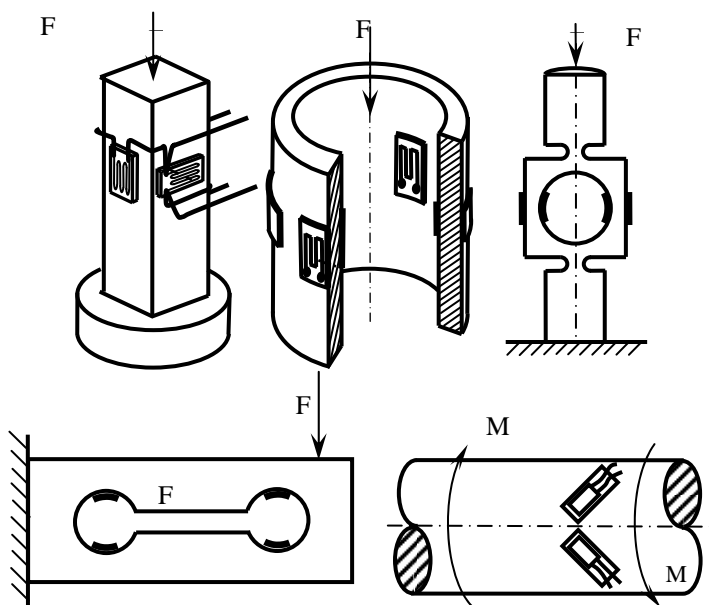


Рис. 13.4. Варианты расположений тензорезисторов на рабочих элементах

Тензорезисторы применяются для измерения:

– механических напряжений и деформаций, тогда они включаются в мостовую измерительную цепь по дифференциальной схеме 1-го типа;

– других механических величин (сил, давлений, ускорений и т. д.), т. е. когда деформация является промежуточной величиной преобразования. В этом случае используется мостовая измерительная цепь, собранная по дифференциальной схеме 2-го типа.

В первом случае в мостовой измерительной цепи используется один тензорезистор, который располагается на рабочем элементе вдоль направления деформации. Основным недостатком такой схемы является зависимость измерения от температуры окружающей среды.

Для компенсации температурной составляющей используются мостовые измерительные цепи с двумя тензорезисторами, которые располагаются на рабочем элементе перпендикулярно друг другу (рис. 13.5) и включаются в разные плечи измерительного моста (рис. 13.6). Так как они находятся в одинаковых температурных условиях, происходит компенсация температурной погрешности, при этом рабочие удлинения под действием деформации будут разные.

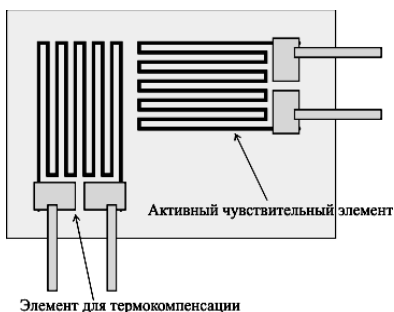


Рис. 13.5. Расположение тензорезисторов на рабочем элементе при компенсации температурной погрешности

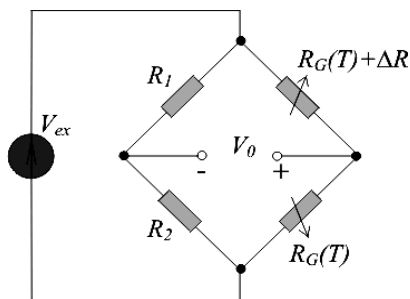


Рис. 13.6. Мостовая измерительная схема включения двух тензорезисторов с компенсацией температурной погрешности

Когда необходимо измерить механическую величину, второй случай, также используются два тензорезистора, при этом один из них работает на растяжение, второй – на сжатие, например, если измеряется механическое напряжение изгибаемой балки. Так как измери-

тельная цепь представляет собой дифференциальную мостовую измерительную схему 2-го типа, то чувствительность измерения по сравнению с предыдущей схемой повышается в два раза, при этом происходит компенсация температурной погрешности (рис. 13.7).

Дальнейшего повышения чувствительности схемы измерений можно достичь, если использовать четыре тензорезистора, из которых два работают на растяжение и два – на сжатие (рис. 13.8).

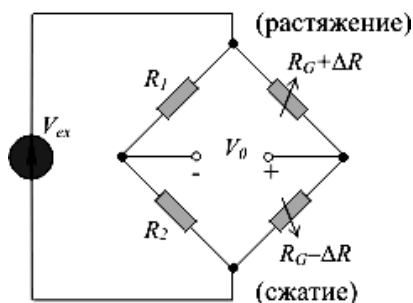


Рис. 13.7. Мостовая измерительная схема включения двух тензорезисторов, работающих на сжатие-растяжение

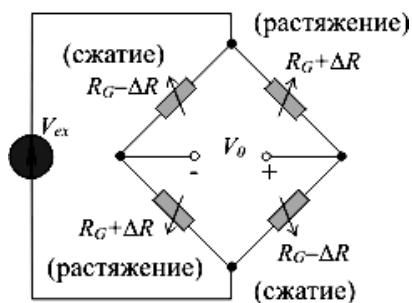


Рис. 13.8. Мостовая измерительная схема включения четырех тензорезисторов, работающих на сжатие-растяжение

Выходные токи в тензометрических измерительных схемах малы, и поэтому приходится использовать усилители, к которым подключаются светолучевые осциллографы и другие самопишущие устройства. Для светолучевых осциллографов выходные сигналы усилителя должны иметь уровень 10–200 мА, а для самопишущих приборов электромеханического типа – 100–500 мА. По напряжению выходные сигналы тензометрических усилителей при нагрузке 2–30 Ом составляют 0–1 В, при нагрузке свыше 1 кОм – 0–10 В.

### Описание лабораторной установки

Тензометрическая весоизмерительная лабораторная установка включает в себя (рис. 13.9) металлическую пластину 1, на которую наклеены тензорезисторы R1, R2, R3, R4. Тензорезисторы включены в мостовую измерительную схему. Переменный резистор R служит для установки нуля. Выходной сигнал подается на показывающий прибор.

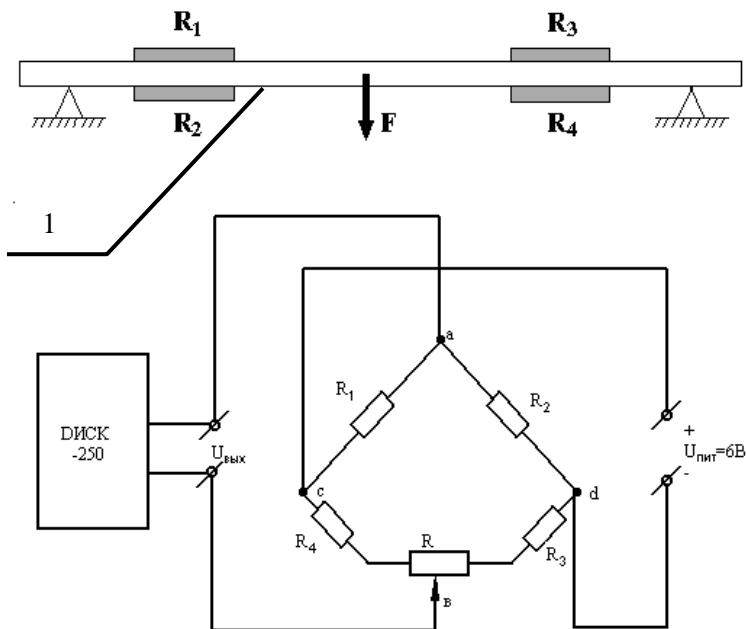


Рис. 13.9. Конструкция и электрическая схема лабораторной установки

### Порядок выполнения работы

1. Получить допуск у преподавателя.
2. Убрав все грузы с платформ тензочувствительных весов, сбалансировать мостовую измерительную схему с помощью переменного резистора.
3. Снять статическую характеристику исследуемой измерительной схемы при увеличении (прямой ход) и уменьшении (обратный ход) нагрузки. Результаты внести в таблицу.
4. По полученным экспериментальным данным построить график зависимости выходного сигнала мостовой измерительной схемы от нагрузки (построить статическую характеристику).

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблица с полученными значениями измерений.
4. Выводы по проделанной работе.

## Список литературы

1. Шушкевич, В. А. Основы электротензометрии / В. А. Шушкевич. – Минск : Вышэйшая школа, 1975. – С. 352.
2. Макаров, Р. А. Тензометрия в машиностроении : справочное пособие / под ред. Р. А. Макарова. – Москва : Машиностроение, 1975. – С. 288.
3. Хорна, М. П. Тензометрические мосты / М. П. Хорна. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – С. 292.

## Лабораторная работа № 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ

#### Цель работы

1. Ознакомиться со способами измерения температуры.
2. Ознакомиться с мостовыми схемами включения терморезисторов.
3. Изучить физические явления, протекающие в полупроводниковых терморезисторах при одновременном термическом и электрическом воздействии на них.
4. Получить вольт-амперную характеристику и проанализировать ее.

#### Инструменты и принадлежности

1. Лабораторный стенд.
2. Вольтметр.

#### Общие сведения

*Температурой* называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Согласно кинетической теории температуру определяют как меру кинетической энергии поступательного движения молекул. Отсюда *температурой* называют условную статистическую величину, прямо пропорциональную средней кинетической энергии молекул тела.

Температура измеряется с помощью устройств, использующих различные термометрические свойства жидкостей, газов и твердых тел. Существуют десятки различных устройств, применяемых в промышленности, при научных исследованиях и для специальных целей.

Ниже в таблице приведены наиболее распространенные устройства для измерения температуры и практические пределы их применения.

### Устройства для измерения температуры

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длительного применения, °С	
		Нижний	Верхний
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-190	600
Изменение давления	Манометрические термометры	-160	60
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления	-200	500
	Полупроводниковые термометры сопротивления	-90	180
Термоэлектрические эффекты	Термоэлектрические термометры (термопары) стандартизованные	-50	1600
	Термоэлектрические термометры (термопары) специальные	1300	2500
Тепловое излучение	Оптические пирометры	700	6000
	Радиационные пирометры	20	3000
	Фотоэлектрические пирометры	600	4000
	Цветовые пирометры	1400	2800

### *Жидкостные стеклянные термометры*

Самые старые устройства для измерения температуры – жидкостные стеклянные термометры (рис. 14.1). Они используют термометрическое свойство теплового расширения тел. Действие термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термо-

метрического вещества и оболочки, в которой она находится (термометрического стекла или реже – кварца).

В качестве термометрического вещества чаще всего применяют химически чистую ртуть. Она не смачивает стекло и остается жидкой в широком интервале температур. Кроме ртути в качестве термометрического вещества в стеклянных термометрах применяются и другие жидкости, преимущественно органического происхождения, например: метиловый и этиловый спирт, керосин, пентан, толуол, галлий, амальгама таллия.

Основные достоинства стеклянных жидкостных термометров – простота употребления и достаточно высокая точность измерения даже для термометров серийного изготовления. К недостаткам стеклянных термометров можно отнести плохую видимость шкалы (если не применять специальной увеличительной оптики) и невозможность ремонта и автоматической записи показаний, их передачи на расстояние.

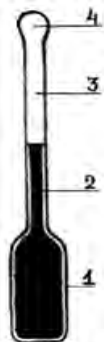


Рис. 14.1. Жидкостный термометр:  
1 – баллон; 2 – термометрическое вещество; 3 – капиллярная трубка;  
4 – запасной резервуар

### *Манометрические термометры*

Действие манометрических термометров (рис. 14.2) основано на использовании зависимости давления вещества при постоянном объеме от температуры. Запаянная измерительная система манометрического термометра состоит из чувствительного элемента, воспринимающего температуру измеряемой среды. При изменении темпера-

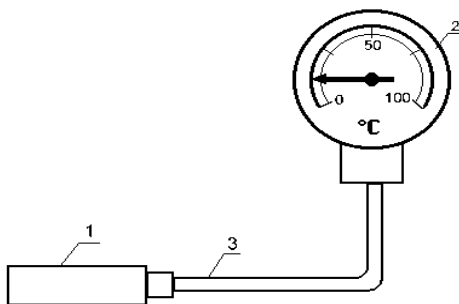


Рис. 14.2. Манометрический термометр:  
1 – термобаллон; 2 – рабочий элемент;  
3 – металлический капилляр



туры измеряемой среды давление в системе изменяется, в результате чего чувствительный элемент перемещает стрелку или перо по шкале манометра, отградуированного в градусах температуры. Манометрические термометры часто используют в системах автоматического регулирования температуры как бесшкальные устройства информации (датчики).

Манометрические термометры подразделяют на три основные разновидности:

- жидкостные, в которых вся измерительная система (термобаллон, манометр и соединительный капилляр) заполнена жидкостью;
- конденсационные, в которых термобаллон частично заполнен жидкостью с низкой температурой кипения и частично – ее насыщенными парами, а соединительный капилляр и манометр – насыщенными парами жидкости или, чаще, специальной передаточной жидкостью;
- газовые, в которых вся измерительная система заполнена инертным газом.

Достоинствами манометрических термометров являются сравнительная простота конструкции и применения, возможность дистанционного измерения температуры и возможность автоматической записи показаний. К недостаткам манометрических термометров относятся относительно невысокая точность измерения; небольшое расстояние дистанционной передачи показаний и трудность ремонта при разгерметизации измерительной системы.

### ***Термоэлектрические термометры***

Для измерения температуры в металлургии наиболее широкое распространение получили термоэлектрические термометры (рис. 14.3), работающие в интервале температур от  $-200$  до  $+2500$  °С и выше. Данный тип устройств характеризуется высокой точностью и надежностью, возможностью использования в системах автоматического контроля и регулирования параметра, в значительной мере определяющего ход технологического процесса в металлургических агрегатах.

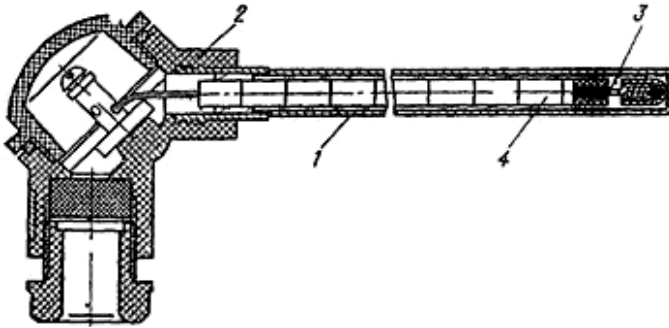


Рис. 14.3. Термоэлектрический термометр:  
 1 – защитный чехол; 2 – головка; 3 – термоэлектроды;  
 4 – керамические трубки

Сущность термоэлектрического метода заключается в возникновении ЭДС в проводнике, концы которого имеют различную температуру. Для того чтобы измерить возникшую ЭДС, ее сравнивают с ЭДС другого проводника, образующего с первым термоэлектрическую пару  $AB$  (рис. 14.4), в цепи которой потечет ток.

Результирующая термоЭДС цепи, состоящей из двух разных проводников  $A$  и  $B$  (однородных по длине):

$$E_{AB}(t_2, t_1) = e_{AB}(t_2) + e_{AB}(t_1)$$

или

$$E_{AB}(t_2, t_1) = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1),$$

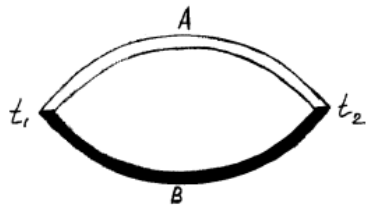


Рис. 14.4. Термопара

где  $e_{AB}(t_2)$  и  $e_{AB}(t_1)$  – разности потенциалов проводников  $A$  и  $B$  соответственно при температурах  $t_2$  и  $t_1$ , мВ.

ТермоЭДС данной пары зависит только от температуры  $t_1$  и  $t_2$  и не зависит от размеров термоэлектродов (длины, диаметра), величин теплопроводности и удельного электросопротивления.

Для увеличения чувствительности термоэлектрического метода измерения температуры в ряде случаев применяют термобатарею: несколько последовательно включенных термопар, рабочие концы которых находятся при температуре  $t_2$ , свободные при известной и постоянной температуре  $t_1$ .

Для измерения в металлургии наиболее широко применяются термоэлектрические термометры со стандартной градуировкой: платинородий-платиновые (ТПП), платинородий-платинородиевые (ТПР), хромель-алюмелевые (ТХА), хромель-капелевые (ТХК), вольфрамений-вольфрамениевые (ТВР). В ряде случаев используют также ТТ с нестандартной градуировкой: медь-константановые, вольфрам-молибденовые (ТВР) и др.

Проверка термоэлектрических термометров сводится к определению температурной зависимости термоЭДС и сравнению полученной градуировки со стандартными значениями.

Градуировка производится двумя методами: по постоянным точкам или сличением.

Градуировка по постоянным (реперным) точкам является наиболее точной и применяется для образцовых термопар. Поверяемому термопару помещают в тигель с металлом высокой чистоты, устанавливают в печь и по мере повышения или понижения температуры металла регистрируют площадку на кривой изменения термоЭДС. Данная площадка соответствует температуре плавления или кристаллизации металла, причем более предпочтительно вести градуировку по точке кристаллизации. В качестве реперных металлов используют золото, палладий, платину и др.

Методом сличения проводится градуировка образцовых термопар второго разряда и технических термоэлектрических термометров. Он заключается в непосредственном измерении термоЭДС градуируемой термопары при постоянной температуре свободных концов  $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$  и различных температурах  $t_2$  рабочего спая, причем последняя определяется с помощью образцового термометра (термопары, пирометра излучения).

### *Электрические термометры сопротивления*

В металлургической практике для измерения температур до  $650\text{ }^\circ\text{C}$  применяются термометры сопротивления (рис. 12.5), принцип действия которых основан на использовании зависимости электрического сопротивления вещества от температуры. Зная данную зависимость, по изменению величины сопротивления термометра судят о температуре среды, в которую он погружен. Выходным параметром устройства является электрическая величина, которая может

быть измерена с весьма высокой точностью (до 0,02 °С), передана на большие расстояния и непосредственно использована в системах автоматического контроля и регулирования.

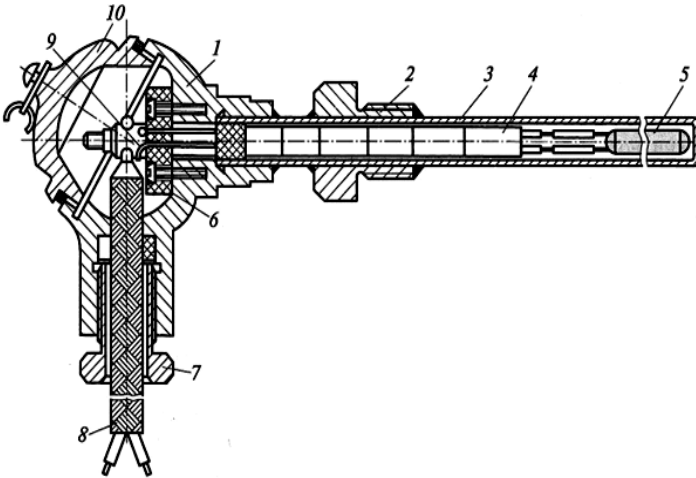


Рис. 14.5. Электрический термометр сопротивления:

- 1 – корпус головки; 2 – штуцер; 3 – защитный чехол; 4 – фарфоровые бусы;  
5 – чувствительный элемент; 6 – клеммная колодка; 7 – сальниковый ввод;  
8 – кабель; 9 – провода; 10 – крышка

Чувствительный элемент термометров сопротивления выполнен из металлической тонкой проволоки с безындукционной каркасной или бескаркасной намоткой. В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления используются чистые металлы: платина, медь, никель, железо и полупроводники.

Изменение электросопротивления данного материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha$ , который вычисляется по формуле

$$\alpha = (R_t - R_0) / (R_0 t), \quad \frac{1}{^\circ\text{C}},$$

где  $R_0$  и  $R_t$  – электросопротивление соответственно при 0 °С и температуре  $t$ , Ом;

$t$  – температура материала, °С.

Сопротивление полупроводников с увеличением температуры резко уменьшается, т. е. они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления практически на порядок больше, чем у металлов. Полупроводниковые термометры сопротивления (ТСПП) в основном применяются для измерения низких температур (1,5–400 К).

Достоинствами ТСПП являются небольшие габариты, малая инерционность, высокий коэффициент  $\alpha$ . Однако они имеют и существенные недостатки:

- нелинейный характер зависимости сопротивления от температуры;
- отсутствие воспроизводимости состава и градуировочной характеристики, что исключает взаимозаменяемость отдельных термометров сопротивления данного типа. Это приводит к выпуску ТСПП с индивидуальной градуировкой.

### ***Бесконтактное измерение температуры***

О температуре нагретого тела можно судить на основании изменения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Чем выше температура тела, тем больше энергии оно излучает.

Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называют *пирометрами*. Они позволяют контролировать температуру от 100 до 6000 °С и выше. Одним из главных достоинств данных устройств является отсутствие влияния измерителя на температурное поле нагретого тела, так как в процессе измерения они не вступают в непосредственный контакт друг с другом. Поэтому данные методы получили название бесконтактных.

На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов:

- пирометры суммарного излучения (ПСИ) – измеряется полная энергия излучения;
- пирометры частичного излучения (ПЧИ) – измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- пирометры спектрального отношения (ПСО) – измеряется отношение энергии фиксированных участков спектра.

## Общие сведения о терморезисторах

*Термосопротивлениями (терморезисторами)* называются устройства, основное свойство которых заключается в способности изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Основным элементом термосопротивления является определенной формы проводник (металл) или полупроводник *n*- или *p*-типа электропроводности с двумя невыпрямляющими контактами.

Различают терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), сопротивление которых падает с возрастанием температуры, часто называемые *термисторами*, и терморезисторы с положительным ТКС, сопротивление которых увеличивается с возрастанием температуры. Такие терморезисторы называются *позисторами*.

Температурная зависимость сопротивления является главной характеристикой терморезисторов, в значительной степени определяющей остальные характеристики этих изделий. Естественно, она аналогична температурной зависимости удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен данный терморезистор.

Уменьшение сопротивления материала с увеличением температуры обуславливается следующими причинами:

- увеличением концентрации носителей заряда;
- увеличением подвижности носителей заряда;
- фазовыми превращениями.

Материалы, из которых делают терморезисторы, должны удовлетворять следующим требованиям: чисто электронная проводимость материала и возможность регулирования ее, стабильность характеристик материала в диапазоне рабочих температур, простота технологии изготовления изделий. Материалы должны быть нечувствительными к загрязнениям в процессе технологического изготовления изделий.

Большое распространение получили оксиды  $\text{CuO}$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiO}$  и их смеси. На основе смесей оксидов меди и марганца получены полупроводниковые материалы с электропроводностью от  $10^{-8}$  до  $10^{-1}$   $(\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ . Также используются окислы титана, ванадия, железа. При изменении соотношения компонентов соответствующих материалов получают заданные значения удельного сопротивления и ТКС.

По конструктивному оформлению терморезисторы можно разделить на следующие типы:

в виде цилиндрических стержней (КМТ-1, ММТ-1, КМТ-4, ММТ-4);  
дисков (СТ1-17, СТ3-17, СТ5-1);

миниатюрных бусинок (СТ1-18, СТ1-19 и др.);

плоских прямоугольников (СТ3-23).

Маркировка содержит лишь самые необходимые и важнейшие сведения о резисторе. Обязательным показателем во всех случаях является номинальное сопротивление.

### *Характеристики и параметры терморезисторов*

Основной характеристикой терморезистора является температурная зависимость его сопротивления. Она совпадает с температурной зависимостью удельного сопротивления полупроводника, из которого изготовлен терморезистор. Во всем рабочем диапазоне температур эта зависимость достаточно точно определяется соотношением

$$R_T = A \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (14.1)$$

где  $R_T$  – сопротивление терморезистора при температуре  $T$ ;

$A$  – величина, зависящая от материала и геометрических размеров терморезистора;

$B$  – постоянная, характеризующая физические свойства материала.

Записав выражения, аналогичные (14.1), для двух температур  $T$  и  $T_0$  и разделив одно на другое, можно исключить параметр  $A$ :

$$R_T = R_0 \exp\left(B \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]\right). \quad (14.2)$$

Соотношение (14.2) не содержит постоянную величину  $A$ . Используя его, можно рассчитать величину сопротивления терморезистора при любой температуре, если известны значение постоянной  $B$  и сопротивление при какой-нибудь определенной температуре  $T_0$ .

Величину постоянной  $B$  легко определить экспериментально, измерив сопротивление терморезистора при двух температурах. Действительно, прологарифмировав выражение (14.2), получим

$$B = \ln \left( \frac{R_T}{R_0} \right) \frac{TT_0}{T_0 - T}.$$

Постоянную  $B$  называют *коэффициентом температурной чувствительности* терморезистора во всем рабочем интервале температур. Сопротивление терморезистора  $R_0$  при определенной температуре (обычно 20 °С) – это *номинальное сопротивление* терморезистора.

Кроме величин  $B$  и  $R_0$  терморезистор характеризуют следующие основные параметры:

– *температурный коэффициент сопротивления*  $\alpha_T$ , который определяется как относительное изменение сопротивления терморезистора при изменении температуры на один градус:

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}.$$

Воспользовавшись выражением (14.1), можно получить следующее соотношение, связывающее  $\alpha_T$  с параметром  $B$ :

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2}. \quad (14.3)$$

Из формулы (14.3) следует, что, зная постоянную  $B$ , можно вычислить  $\alpha_T$  для любой температуры.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводниковых терморезисторов в десятки раз больше, чем у металлических. Например, сопротивление платинового терморезистора при его нагреве от 0 до 300 °С меняется примерно в два раза. В то же время нетрудно изготовить такой полупроводниковый терморезистор, сопротивление которого при этом изменится в тысячу раз;

– *постоянная времени*  $\tau$ , отражающая тепловую инерционность терморезисторов. Она равна времени, в течение которого превышение



температуры рабочего тела терморезистора над окружающей средой при охлаждении его уменьшится в  $e$  (приблизительно в 2,7) раз. Величина постоянной времени терморезистора может изменяться от десятых долей секунды до сотен секунд;

– *предельно допустимая мощность рассеивания*. При высоких температурах в полупроводниковом материале терморезистора могут происходить необратимые структурные изменения, в результате которых изменяются параметры прибора. Наибольшую температуру, при которой терморезистор сохраняет стабильность параметров при длительной эксплуатации, называют предельно допустимой. Соответствующую этой температуре мощность рассеяния называют максимальной (предельно допустимой) мощностью рассеяния. Обычно ее указывают для температуры окружающей среды 20 °С;

– *коэффициент рассеяния  $H$* , численно равный мощности, отводимой от терморезистора в окружающую среду при разности температур поверхности и окружающей среды в 1°.

### ***Вольт-амперная характеристика терморезистора***

Статическая вольт-амперная характеристика терморезистора – это зависимость протекающего через терморезистор тока от падения напряжения на нем в условиях теплового равновесия между терморезистором и окружающей средой. Типичная вольт-амперная характеристика терморезистора представлена на рис. 14.6. Как видно из этого рисунка, она имеет ярко выраженный нелинейный характер.

Можно выделить три основных участка:  $OA$ ,  $AB$  и  $BC$ . На начальном участке  $OA$ , соответствующем относительно малым приложенным к терморезистору напряжениям, вольт-амперная характеристика линейна. Это связано с тем, что при малых напряжениях электрическая энергия, выделяемая в терморезисторе, мала и заметно не изменяет его температуру. При дальнейшем увеличении напряжения (участок  $AB$ ) выделяемая энергия приводит к повышению температуры и уменьшению сопротивления. Это вызывает увеличение тока, что обуславливает дальнейшее повышение температуры терморезистора, уменьшение его сопротивления и дальнейший рост тока. Следствием такой положительной связи по току на начальном этапе является нарушение (участок  $AB$ ) линейности вольт-амперной характе-

ристики, а затем появление участка  $BC$  с отрицательным сопротивлением. Дальнейшее увеличение тока (участок выше точки  $C$ ) снова приводит к росту напряжения на образце. Этот участок соответствует температуре, когда протекающий ток разогревает его до величины, соответствующей температуре примерного истощения. В этом случае дальнейшее повышение температуры не будет сопровождаться ростом проводимости и с увеличением тока напряжение начнет расти.

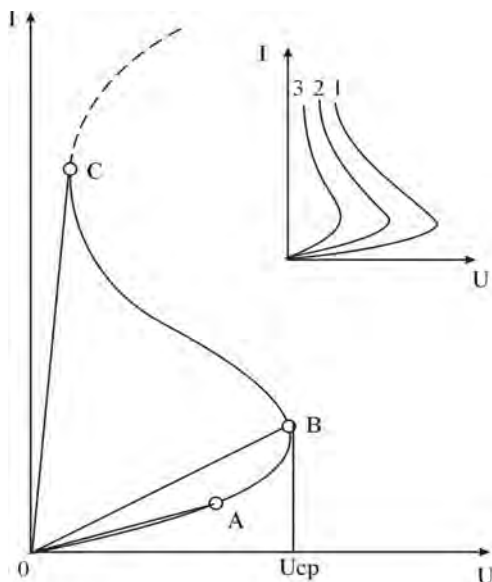


Рис. 14.6. Статическая вольт-амперная характеристика терморезистора

Статическое сопротивление терморезистора в любой точке вольт-амперной характеристики определяется как котангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат в эту точку. Из рис. 14.6 видно, что величина статического сопротивления монотонно убывает с ростом тока, так как

$$\operatorname{ctg}\beta_c < \operatorname{ctg}\beta_b < \operatorname{ctg}\beta_a. \quad (14.4)$$

Вольт-амперная характеристика терморезистора может изменяться под влиянием различных причин и, прежде всего, при изменении

температуры окружающей среды. На рис. 14.6 качественно представлен вид вольт-амперных характеристик терморезистора при различных температурах окружающей среды ( $T_1 < T_2 < T_3$ ). С ростом температуры  $T$  напряжение  $U_{\text{ср}}$ , которому соответствует начало падающего участка вольт-амперной характеристики, уменьшается. Вольт-амперная характеристика «прижимается» к оси токов и спрямляется. Качественно заключение о характере трансформации вольт-амперной характеристики терморезистора при изменении температуры вытекает из анализа соотношения (14.4). Действительно, предположим, что через терморезистор, находящийся при температуре  $T_1$ , протекает постоянный ток. Сопротивление терморезистора в какой-либо точке вольт-амперной характеристики при температуре  $T_1$ , соответствующей выбранной величине тока, характеризуется определенным углом  $\beta_1$ . При повышении температуры сопротивление терморезистора падает. Следовательно, при температуре  $T_2$  угол  $\beta_2$  должен быть больше угла  $\beta_1$ . Это означает, что с увеличением температуры выбранная точка на вольт-амперной характеристике, снятой при температуре  $T_1$ , должна сместиться влево по шкале напряжений. Аналогичные рассуждения применимы для любой точки вольт-амперной характеристики. Результатом их является заключение о том, что при повышении температуры внешней среды вся характеристика смещается влево.

Рассмотрим, как при этом изменяется положение максимума вольт-амперной характеристики. Мощность, рассеиваемая в терморезисторе, определяется как электрическими, так и его тепловыми характеристиками. В установившемся режиме вся мощность, выделяемая в рабочем теле терморезистора, рассеивается в окружающую среду. Поэтому

$$P_T = \frac{U_T^2}{R_T} = I_T^2 R_T = H(T - T_1), \quad (14.5)$$

где  $H$  – коэффициент теплоотдачи или рассеяния;

$T_1$  – температура окружающей среды.

Подставив в (14.5) значения  $R_T$  из (14.2), получим следующее уравнение вольт-амперной характеристики терморезистора в параметрической форме:

$$U_T = \sqrt{HR_0(T - T_1) \exp\left(\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T}\right)}; \quad (14.6)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{H}{R_0}(T - T_1) \exp\left(-\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T}\right)}.$$

Таким образом, вид статической вольт-амперной характеристики терморезистора определяется коэффициентом рассеяния  $H$ , коэффициентом температурной чувствительности  $B$ , номинальным сопротивлением терморезистора  $R_0$  и температурой окружающей среды  $T_1$ .

Значения максимального напряжения  $U_{cp}$  и тока  $I_{cp}$ , соответствующего этому напряжению, можно определить, взяв первую производную по  $T$  и приравняв ее нулю. В результате получим

$$T_{max}^2 - BT_{max} + BT_0 = 0.$$

Температура терморезистора в точке максимума

$$T_{max} = \frac{B - \sqrt{B(B - 4T_0)}}{2}. \quad (14.7)$$

Подставив (14.7) в (14.6), получим значения  $U_{cp}$  и  $I_{cp}$ .

Из выражений (14.7) и (14.6) видно, что:

*во-первых*, статическая вольт-амперная характеристика терморезистора будет иметь экстремальные значения напряжения только при условии  $B > 4T_0$ ;

*во-вторых*, температура терморезистора при экстремальных значениях напряжения не зависит от коэффициента рассеяния. Поэтому максимумы статических вольт-амперных характеристик терморезистора, помещенного в различные среды, должны наблюдаться при одних и тех же сопротивлениях терморезистора. Коэффициент рассеяния влияет только на значения напряжения и тока в точке максимума статической вольт-амперной характеристики;

*в-третьих*, при увеличении температуры окружающей среды уменьшается сопротивление терморезистора и снижается максимум статической вольт-амперной характеристики терморезистора.

### ***Режимы работы терморезисторов***

В зависимости от сферы применения терморезисторов используются два основных режима их включения в электрическую цепь.

Особенностью *первого режима* является малое напряжение (меньше  $U_{cp}$ ), прикладываемое к терморезистору. В этом случае ток, протекающий через терморезистор, не вызывает его заметного разогрева. Величина тока определяется по закону Ома

$$I = U / R_T,$$

где  $R_T$  – сопротивление терморезистора, которое зависит только от температуры окружающей среды.

Этот режим используется при измерении температуры с помощью терморезистора.

Использование терморезисторов в качестве переключателей (второй режим) базируется на так называемом релейном эффекте.

*Релейным эффектом* в цепи, содержащей терморезистор и сопротивление нагрузки  $R_n$ , называют резкое нарастание или убывание тока, вызванное изменением сопротивления терморезистора. Величина сопротивления нагрузки и напряжение источника питания выбираются таким образом, чтобы нагрузочная линия пересекала вольт-амперную характеристику терморезистора в трех точках. Схематично принцип действия переключателя на основе терморезистора можно пояснить, обратившись к рис. 14.7, где приведены вольт-амперные характеристики терморезистора, соответствующие температурам окружающей среды  $T_1$  (кривая 1), температуре  $T_2 > T_1$  (кривая 2) и линейного элемента  $R_n$ .

После включения источника питания устанавливается рабочая точка **a** и в цепи протекает небольшой ток. Как видно из (14.6), напряжение на терморезисторе уменьшается при повышении температуры окружающей среды или при уменьшении коэффициента рассеяния  $H$ . При воздействии какого-либо из указанных факторов, например повышении температуры, вольт-амперная характеристика терморезистора изменяется от кривой 1 к кривой 2 (см. рис. 14.7).

Рабочая точка перемещается из  $a$  в  $b$ , и ток в цепи резко увеличивается. При возвращении внешней температуры к первоначальному значению рабочая точка перемещается из  $b$  в  $v$  и высокое значение тока в цепи сохраняется.

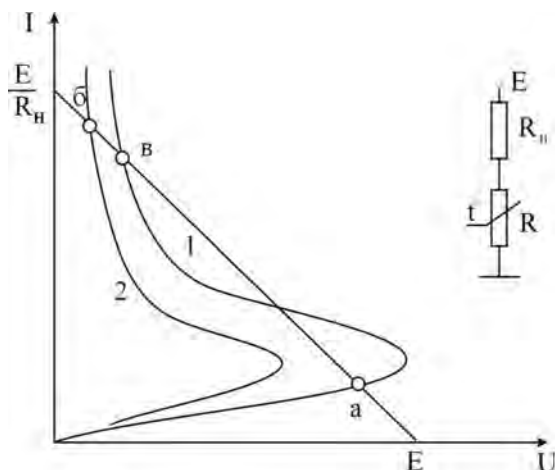


Рис. 14.7. Схема переключателя на основе терморезистора

Часто в такой схеме вместо сопротивления нагрузки включается обмотка электромагнитного реле, которое срабатывает при увеличении тока в цепи.

Релейный эффект используется в схемах тепловой защиты, температурной сигнализации, автоматического регулирования температуры, а также в устройствах, реагирующих на изменение влажности, скорости потока жидкости и т. д.

### Мостовые схемы включения электрических термометров сопротивления

Для измерения сопротивления электрических термометров используют четырехплечие уравновешенные (ручные или автоматические) и неуравновешенные мосты.

#### *Уравновешенный мост*

Уравновешенный мост, принципиальная схема которого приведена на рис. 14.8,  $a$ , используется для определения величины сопротив-

ления при градуировке термометров сопротивления и измерениях температуры в лабораторных условиях.

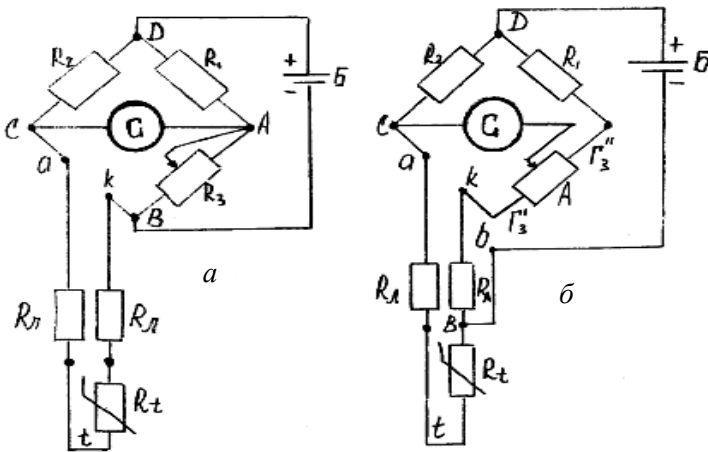


Рис. 14.8. Мостовые схемы измерения сопротивления термометров

Нулевой метод измерения характеризуется высокой точностью, так как исключается влияние окружающей температуры, магнитных полей и изменения напряжения батареи питания Б. Однако значительная погрешность может возникать при изменении сопротивления соединительных проводов  $R_{л}$ , что вызывается значительными сезонными и суточными колебаниями температуры в местах прохождения кабеля, соединяющего термометры сопротивления и измерительный мост.

На рис. 14.8, б представлена трехпроводная схема включения термометров сопротивления, в которой одна вершина диагонали питания (B) перенесена непосредственно к термометру. Для условия равновесия можно записать

$$\frac{R_1 + r_3''}{r_3' + R_{л}} = \frac{R_2}{R_t + R_{л}},$$

откуда

$$R_1 = \frac{R_2 r_3'}{R_1 + r_3''} + \left( \frac{R_2}{R_1 + r_3''} - 1 \right) R_{л}.$$

Сопротивления проводов  $R_d$  оказываются включенными в различные плечи моста, поэтому изменение их величины  $\Delta R_d$  практически взаимно компенсируется.

### ***Неуравновешенный мост***

Неуравновешенный мост исключает необходимость выполнения ручных операций по изменению величины  $R_3$ . В нем вместо нуль-прибора  $G$  в диагональ моста  $AC$  устанавливается миллиамперметр. При постоянном напряжении питания и постоянных сопротивлениях  $R_1, R_2, R_3$  через этот прибор протекает ток, величина которого зависит (нелинейно) от изменения  $R_t$ . Использование данных мостов для измерения температуры ограничено. В основном они применяются для преобразования сопротивления термометра в напряжение.

### ***Автоматические уравновешенные мосты***

Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с термометром сопротивления. Их характеризуют высокая точность и возможность использования в системах автоматического регулирования. Мосты выпускаются различных модификаций: одно- и многоточечные, с дисковой или ленточной диаграммой, с сигнальными устройствами и др.

На рис. 14.9 приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста, который так же, как ручной равновесный мост, реализует нулевой метод измерения сопротивления.

Термометр сопротивления  $R_t$  подключен к прибору по трехпроводной схеме. В измерительную схему моста входят:

уравновешивающий реохорд  $R_p$  с шунтирующим его резистором  $R_{ш}$  (ограничивает ток, текущий по реохорду);

резисторы  $R_n$  и  $R_k$ , определяющие начало и конец шкалы;

спирали  $r_n$  и  $r_k$ , обеспечивающие точную подгонку диапазона шкалы и являющиеся частью резисторов  $R_n$  и  $R_k$ ;

резисторы  $R_1, R_2$  и  $R_3$ , образующие постоянные плечи моста;

термометр сопротивления  $R_t$ , являющийся переменным плечом;

балластный резистор  $R_b$ , который ограничивает ток в мостовой схеме и обеспечивает минимальный нагрев термометра сопротивления;



подгоночные резисторы  $R_{п1}$  и  $R_{п2}$ , обеспечивающие сопротивление подводящей линии  $R_{л} = 5$  Ом (каждый из двух соединительных проводов имеет сопротивление 2,5 Ом).

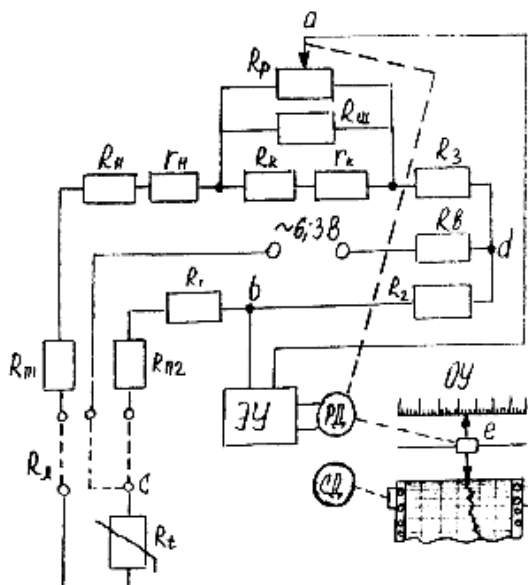


Рис. 14.9. Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

Электронный усилитель переменного тока ЭУ включен в диагональ  $ab$  и обеспечивает усиление разбаланса, возникающего в измерительной схеме при изменении сопротивления ТС  $R_t$ . Усиленный сигнал поступает на вход реверсивного двигателя РД, который вращением вала заставляет перемещаться подвижную каретку регистрирующего устройства  $e$  и движок реохорда  $R_p$ . Вращение вала происходит до тех пор, пока не наступит новое равновесие схемы; напряжение разбаланса станет равным 0, сигнал на входе РД также исчезнет и двигатель остановится.

Питание измерительной схемы моста производится через диагональ  $d$  с помощью силового трансформатора ЭУ переменным током напряжением 6,3 В и частотой 50 Гц. Синхронный двигатель СД перемещает диаграммную бумагу относительно пера или печатающего устройства с постоянной скоростью.

## Описание лабораторного стенда для исследования характеристик терморезисторов

Установка для измерения характеристик терморезисторов (рис. 14.10) состоит из основания 1, на котором установлена камера 2. В камере 2 смонтированы электронагреватель 3, исследуемые терморезисторы 4 и термометр 5. Полость камеры 2 заполнена машинным маслом. Для получения объективных результатов терморезисторы располагаются рядом друг с другом и для уравнивания температуры в камере применяется мешалка 6. Для быстрого охлаждения масла используется крыльчатка 7. Для быстрого охлаждения масла используется крыльчатка 7.

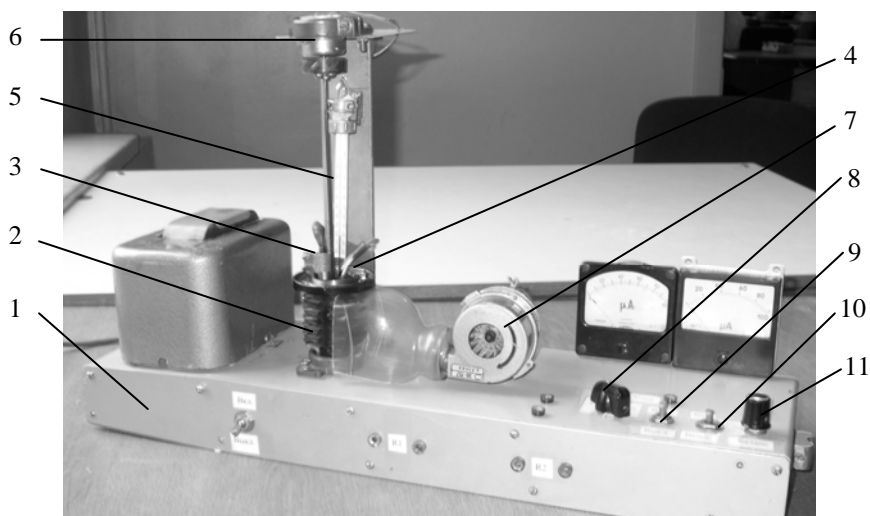


Рис. 14.10. Установка лабораторная для исследования характеристик терморезисторов:

- 1 – основание; 2 – камера; 3 – электронагреватель; 4 – терморезисторы; 5 – термометр;  
6 – мешалка; 7 – крыльчатка; 8 – тумблер «Режим»; 9 – тумблер «Нагрев»;  
10 – тумблер «Охлаждение»; 11 – настроечный резистор

### Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к выполнению работы.
2. Установить тумблер «Режим» в положение I.
3. Включить лабораторную установку.

4. Включить вольтметр в режим измерения сопротивления и подключить его к лабораторной установке при помощи соединительных проводов для измерения сопротивления  $R_1$ .

5. Включить тумблер «Нагрев».

6. Измерить зависимость сопротивления от температуры, в диапазоне от 25 до 60 °С через 3 °С, для первого терморезистора  $R_1$ .

7. Выключить тумблер «Нагрев» и включить тумблер «Охлаждение».

8. Измерить зависимость сопротивления от температуры, в диапазоне от 60 до 25 °С через 3 °С, для первого терморезистора  $R_1$ .

9. Построить зависимость  $R_T = f(T)$ .

10. Установить тумблер «Режим» в положение II.

11. Включить вольтметр в режим измерения напряжения и для измерения напряжения разбалансировки  $U_{разб}$  подключить его к лабораторной установке при помощи соединительных проводов.

12. Настраечным резистором сбалансировать измерительный мост, обеспечив «нуль» на вольтметре.

13. Включить тумблер «Нагрев».

14. Измерить значение  $U_{разб}$  при изменении температуры в диапазоне от 25 до 60 °С через 5 °С.

15. Выключить тумблер «Нагрев» и включить тумблер «Охлаждение».

16. Построить зависимость  $U_{разб} = f(T)$ .

17. Повторить пункты 10–16 для программы III и IV по схемам включения терморезисторов, рис. 14.11.

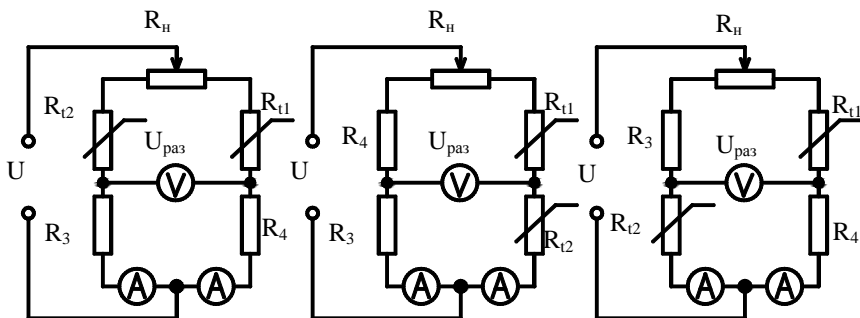


Рис. 14.11. Схемы включения терморезисторов

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица с результатами измерений.
5. Графики зависимостей  $R_{\text{нагр}} = f(t)$  и  $R_{\text{охл}} = f(t)$ .
6. Выводы по проделанной работе.

## Список литературы

1. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – Москва: Энергия, 1978. – 704 с.
2. Чистяков, С. Ф. Теплотехнические измерения и приборы / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун. – Москва: Высшая школа, 1972. – 392 с.

## Лабораторная работа № 15

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛЬТМЕТРА НА РЕЖИМ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ

#### Цель работы

1. Изучить принцип действия электронного и электромеханического вольтметра.
2. Произвести измерения напряжений разными приборами.
3. Проанализировать результаты измерения и указать причины различия в показаниях.

#### Инструменты и принадлежности

1. Генератор сигналов специальной формы.
2. Измерительные приборы.

#### Общие сведения

Измерения напряжения и силы тока в электрических цепях относятся к наиболее распространенным видам измерений. При этом

преобладающее значение имеет измерение напряжения, так как чаще всего этой величиной принято характеризовать режимы работы различных цепей и устройств. К тому же параллельный метод подключения вольтметра к участку цепи, как правило, не приводит к нарушению электрических процессов в ней, поскольку входное сопротивление прибора выбирается достаточно большим. При измерениях же тока приходится размыкать исследуемую цепь и в ее разрыв последовательно включать амперметр, внутреннее сопротивление которого отлично от нуля. Однако в ряде случаев необходимы как прямые, так и косвенные измерения силы тока, поэтому вопросы измерения напряжения и тока рассматриваются совместно.

Задача измерения постоянных напряжения и силы тока заключается в нахождении их значения и полярности. Целью измерения переменных напряжения и силы тока является определение какого-либо их параметра. Так как, согласно закону Ома, напряжение и сила тока связаны линейной зависимостью, чаще проводят измерение напряжения и по его значению аналитически вычисляют силу тока.

Современные методы и средства измерений позволяют измерять напряжения в диапазоне  $10^{-10}$ – $10^6$  В и силу тока в диапазоне  $10^{-18}$ – $10^5$  А. Вместе с тем данные измерения должны осуществляться в очень широкой полосе частот – от постоянного тока до сверхвысоких частот. Такие крайние значения величин требуют уникальных методов измерения.

Измерение параметров переменного напряжения – сложная метрологическая задача, связанная с обеспечением требуемого частотного диапазона и учетом формы кривой измеряемого сигнала. Переменное напряжение (переменный ток) промышленной частоты имеет синусоидальную форму:

$$U(\tau) = U_m \sin(\omega_\tau + \varphi),$$

и его мгновенное значение  $U(\tau)$  характеризуется несколькими основными параметрами: амплитудой  $U_m$ , круговой частотой  $\omega_\tau$  и начальной фазой  $\varphi$ .

Уровень переменного напряжения может быть определен по амплитудному, среднему квадратическому, среднему (постоянной составляющей) или средневыпрямленному значениям.

Мгновенные значения напряжения  $U(\tau)$  наблюдают на экране осциллографа или другого индикаторного устройства и определяют в каждый момент времени (рис. 15.1).

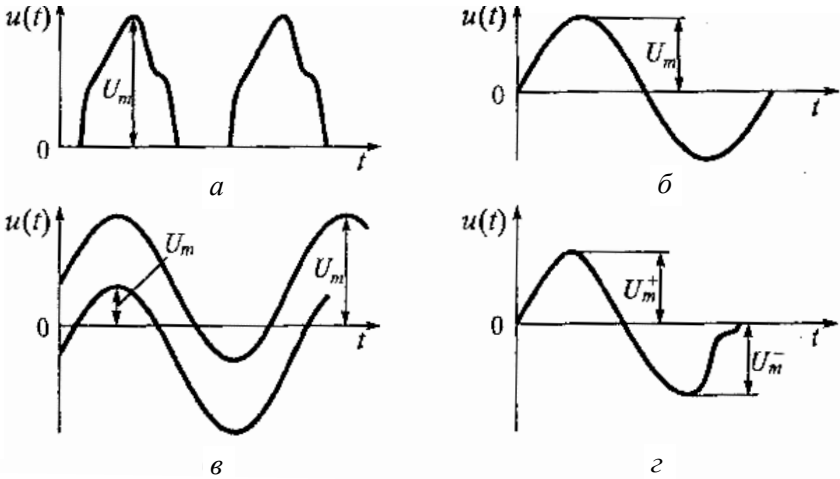


Рис. 15.1. Иллюстрации к понятию «амплитуда напряжения»:  
*a* – импульсы положительной полярности; *б* – синусоидальное напряжение;  
*в* – сумма синусоиды и постоянной составляющей;  
*г* – несинусоидальное колебание

Амплитуда (высота, пиковое значение)  $U_m$  – наибольшее мгновенное значение напряжения за время наблюдения или за период.

Измеряемые напряжения могут иметь различный вид по форме импульсов, гармонических или негармонических колебаний – суммы синусоиды с постоянной составляющей и т. д. (рис. 15.1, *a*, *б*, *в*). При разнополярных несимметричных кривых формы напряжения различают два амплитудных значения (рис. 15.1, *г*): положительное  $U_{+m}$  и отрицательное  $U_{-m}$ .

Среднее квадратическое значение напряжения определяется как корень квадратный из среднего квадрата мгновенного значения напряжения за время измерения (или за период):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}.$$

Если периодический сигнал несинусоидален, то квадрат среднего квадратического значения равен сумме квадратов постоянной составляющей и средних квадратических значений гармоник:

$$U^2 = U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots$$

Среднее значение (постоянная составляющая) напряжения равно среднему арифметическому из мгновенных значений за время изменения (или за период):

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt.$$

Средневыпрямленное напряжение определяется как среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T |U^2(t)| dt.$$

Для напряжения одной полярности среднее и средневыпрямленное значения равны. В случае разнополярных напряжений эти два значения могут существенно отличаться друг от друга. Так, для гармонического напряжения  $U_{cp} = 0$ ,  $U_{cp.v} = 0,637 U_m$ .

Наиболее часто измеряют среднее квадратическое значение напряжения, так как этот параметр связан с мощностью, нагревом и потерями. Однако проще измерить амплитудное или средневыпрямленное значение и произвести пересчет с применением коэффициентов амплитуды  $K_a$  и формы  $K_\phi$ . В частности, для синусоидальной (гармонической) формы переменного напряжения  $K_a = 1,41$ ;  $K_\phi = 1,11$ .

### **Основные типы приборов, измеряющих напряжение и силу тока**

Напряжение и силу тока измеряют приборами непосредственной оценки или приборами, использующими метод сравнения (компенсаторами). По структурному построению всевозможные приборы, измеряющие напряжение и силу тока, условно можно разделить на три основных типа:

- 1) электромеханические;
- 2) электронные аналоговые;
- 3) цифровые.

### *Электромеханические приборы*

Раньше для измерения напряжения и силы тока широко применялись электромеханические приборы. Приборы этих систем часто входят в состав и других, более сложных, средств измерений.

Электромеханические приборы непосредственной оценки измеряемой величины представляют класс приборов аналогового типа, обладающих рядом положительных свойств: просты по устройству и в эксплуатации, обладают высокой надежностью и на переменном токе реагируют на среднее квадратическое значение напряжения. Последнее обстоятельство позволяет измерять наиболее информативные параметры сигнала без методических ошибок. Электромеханические измерительные приборы строят по обобщенной структурной схеме, показанной на рис. 15.2.

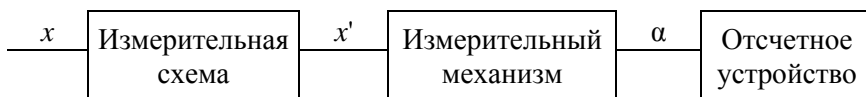


Рис. 15.2. Структурная схема электромеханического прибора








Измерительная схема электромеханического прибора состоит из совокупности сопротивлений, индуктивностей, емкостей и других элементов электрической цепи прибора и осуществляет количественное или качественное преобразование входной величины  $x$  в электрическую величину  $x'$ , на которую реагирует измерительный механизм. Последний преобразует электрическую величину  $x'$  в механическое угловое или линейное перемещение  $\alpha$ , значение которого отражается на шкале отсчетного устройства, проградуированной в единицах измеряемой величины  $N(x)$ . Для этого необходимо, чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовало одно и только одно определенное отклонение  $\alpha$ . При этом параметры схемы и измерительного механизма не должны меняться при изменении внешних условий: температуры окружающей среды, частоты питающей сети и других факторов.



Классификацию электромеханических приборов производят на основании типа измерительного механизма. Наиболее распространенными в практике радиотехнических измерений являются следующие системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, электростатическая.

Некоторые характеристики и свойства аналоговых измерительных приборов указываются на их шкалах или корпусах в соответствии с ГОСТ 23217.

#### Обозначения системы прибора

-  – прибор магнитоэлектрической системы;
-  – прибор магнитоэлектрической системы с выпрямителем;
-  – прибор электродинамической системы;
-  – прибор ферродинамической системы;
-  – прибор электромагнитной системы;
-  – прибор электростатической системы;
-  – прибор индукционной системы.

#### Обозначения классов точности прибора

- 1,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности, которая определена при нормирующем значении  $x_{нрм} = |x|_{\max}$  (нормируется, если мультипликативная составляющая погрешности мала по сравнению с аддитивной составляющей); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{\text{инст}}| \leq \frac{\gamma_{\text{си}} |x|_{\max}}{100},$$

где  $\gamma_{\text{си}}$  – численное обозначение класса точности средства измерения.

- 1,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной относительной погрешности, которая определена при нормирующем значении  $x_{нрм} = |x|$  нормируется, если аддитивная составляющая погрешности мала по сравнению с мультипликативной составляющей); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{си} |x|}{100},$$

где  $\gamma_{си}$  – численное обозначение класса точности средства измерения;

$x$  – результат измерения.




- 1,5** – обозначение класса точности прибора, численно равное пределу допускаемой основной приведенной погрешности, которая определена при нормирующем значении  $x_{нрм} = |x_{max} - x_{min}|$  (нормируется, когда нулевое значение измеряемой величины находится либо внутри диапазона, либо вне его); в подобных случаях это означает, что абсолютная инструментальная погрешность исправного средства измерений в нормальных условиях эксплуатации не должна превышать значения

$$|\Delta_{инст}| \leq \frac{\gamma_{си} |x_{max} - x_{min}|}{100},$$










где  $\gamma_{си}$  – численное обозначение класса точности средства измерения.

- 1,5** – обозначение класса точности прибора (только аналогового омметра), численно равное пределу основной приведенной погрешности, которая определена как выраженное в процентах отношение длины участка шкалы  $\Delta l$ , мм, соответствующего максимальной абсолютной погрешности, к общей длине шкалы  $L$ , мм.

### Обозначения вида тока (напряжения)

-  – постоянный ток (напряжение);
-  – переменный ток (напряжение);
-  – постоянный и переменный ток (напряжение).

### Другие обозначения

-  – нормальное рабочее положение прибора вертикальное (на щите);
-  – нормальное рабочее положение прибора горизонтальное;
-  – испытательное напряжение прочности изоляции 500 В;
-  – испытательное напряжение, превышающее 500 В (здесь 2 кВ);
-  – прибор не подлежит испытанию прочности изоляции;
-  – перед использованием прибора внимательно изучить инструкцию по его эксплуатации;
-  – зажим не изолирован от высокого напряжения;
-  – зажим соединен с корпусом, не заземляется;
-  – зажим соединен с корпусом, заземляется.

### *Магнитоэлектрическая система*

Магнитное поле создается постоянным магнитом, прошедшим стабилизацию (рис. 15.3).

Между полюсами магнита расположен сердечник таким образом, чтобы воздушный зазор, в котором движется рамка с обмоткой, был равномерным. В обмотку рамки через пружинки или иные упругие элементы, например растяжки, поступает ток  $I$ , и в результате его взаимодействия с постоянным магнитным полем возникает вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = BS\omega I,$$

где  $B$  – индукция магнитного поля в зазоре;  
 $S$  – площадь обмотки рамки;  
 $w$  – число витков обмотки рамки.



Рис. 15.3. Прибор магнитоэлектрической системы

Вращающему моменту противодействует момент, создаваемый пружинкой или растяжкой, который в пределах упругих деформаций этих элементов линейно зависит от угла поворота рамки  $\alpha$ :

$$M_{\text{пр}} = W\alpha,$$

где  $W$  – жесткость пружинки (растяжки).

В установившемся состоянии, когда  $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$ :

$$\alpha = \frac{BSw}{W} I$$

с такой точностью, которая обеспечивается стабильностью индукции магнитного поля в зазоре и жесткости пружинки (растяжки). Современные технологии изготовления и стабилизации магнитов и упругих элементов позволяют достигать значений основной приведенной погрешности магнитоэлектрических приборов вплоть до 0,1 %.

Поскольку угол поворота рамки и, следовательно, стрелки линейно зависит от тока в рамке, шкалы автономно применяемых магнитоэлектрических приборов равномерные.

На основе магнитоэлектрического механизма создаются вольтметры, амперметры, миллиамперметры и другие измерительные приборы, и их структурное построение определяется главным образом измерительной схемой. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы имеют достаточно высокую точность, сравнительно малое потребление энергии из измерительной цепи, высокую чувствительность, но работают лишь на постоянном токе.

Основное использование получили переносные, лабораторные, многопредельные амперметры и вольтметры постоянного тока. Класс точности 0,05–0,5, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} \approx 10^{-5} - 10^{-4}$  Вт.

Особую группу измерителей тока составляют высокочувствительные магнитоэлектрические приборы – нуль-индикаторы или гальванометры. Их задача – показать наличие или отсутствие тока в цепи, поэтому они работают в начальной точке шкалы и должны обладать большой чувствительностью. Гальванометры снабжают условной шкалой и не нормируют по классам точности. Современные гальванометры позволяют измерять токи  $10^{-5} - 10^{-12}$  А и напряжения до  $10^4$  В.

Для расширения пределов измерения токов амперметрами и напряжений вольтметрами применяют шунты и добавочные сопротивления, которые включают в схемы этих приборов соответственно параллельно и последовательно индикаторам.

### *Электромагнитная система*

Принцип действия электромагнитной системы (рис. 15.4) заключается в следующем: вращающий момент создается за счет того, что ток  $i(t)$ , протекающий по катушке, выполненной как соленоид со щелевидным отверстием, создает электромагнитное поле, которое внутри катушки втягивает фигурную пластину, изготовленную из электротехнической стали. Этот момент пропорционален квадрату силы тока и поэтому содержит постоянную и переменную составляющие. Частота первой гармоники переменной составляющей равна удвоенной частоте первой гармоники измеряемой силы тока. Прибор электромагнитной системы может работать на переменном токе. Однако электромагнитные приборы являются все-таки низко-

частотными, так как с ростом частоты сильно возрастает индуктивное сопротивление катушки.

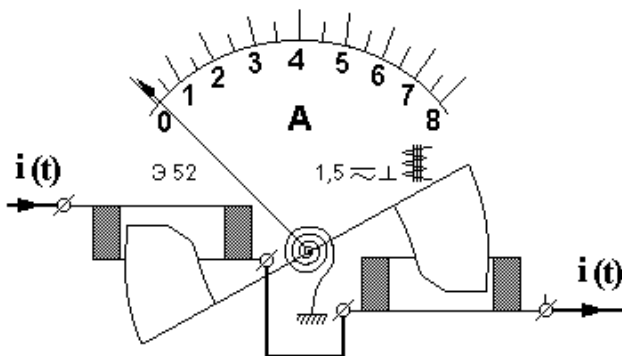


Рис. 15.4. Принцип действия прибора электромагнитной системы

Уравнение шкалы или передаточная функция электромагнитной измерительной системы выражается как

$$\alpha = \frac{1}{2W} I_2 \frac{dL}{d\alpha},$$

где  $I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt;$

$L$  – индуктивность катушки.

В силу квадратической зависимости вращающего момента от силы тока шкала электромагнитных приборов неравномерна. Равномерности шкалы на рабочей части добиваются путем подбора форм пластин, втягивающихся в катушку.

Достоинствами приборов электромагнитной системы являются: отсутствие токоподводов к подвижной части, способность выдерживать значительные перегрузки, простота конструкции, низкая трудоемкость в изготовлении и низкая стоимость используемых материалов и, следовательно, более низкая цена по сравнению с другими приборами, имеющими равные метрологические свойства, возможность градуировки приборов, предназначенных для измерений в цепях переменного тока. К недостаткам приборов этой системы можно отне-

сти большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние магнитных полей.

На практике применяют амперметры электромагнитной системы с пределами измерения от долей ампера до 200 А и вольтметры – от долей вольта до сотен вольт. Основное использование – в виде щитовых и лабораторных переносных низкочастотных амперметров и вольтметров ( $f = 0\text{--}5$  кГц). Класс точности 0,5–2,5, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} = 1\text{--}6$  Вт.

### Электродинамическая система

Измерительный механизм содержит две измерительные катушки: неподвижную и подвижную (рис. 15.5). Принцип действия основан на взаимодействии катушек, электромагнитные поля которых взаимодействуют в соответствии с формулой

$$M = I_1 I_2 \cos \theta \frac{dM}{d\alpha},$$

где  $M_{\text{вр}}$  – вращающий момент;

$I_1$  – ток через неподвижную катушку;

$I_2$  – ток через подвижную катушку;

$\theta$  – фазовый сдвиг между синусоидальными токами;

$M$  – коэффициент взаимной индуктивности катушек.

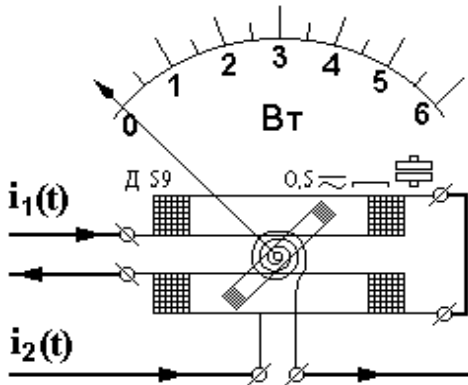


Рис. 15.5. Приборы электродинамической системы, принцип действия, варианты применения

Момент инерции подвижной части прибора (катушка и стрелка) достаточно велик, и поэтому она не успевает реагировать на быстрые изменения токов, т. е. является простым механическим низкочастотным фильтром.

На основе электродинамического механизма в зависимости от схемы соединения обмоток могут изготавливаться вольтметры, амперметры, ваттметры. Достоинством электродинамических вольтметров и амперметров является высокая точность на переменном токе. Предел основной приведенной погрешности может быть 0,1–0,2 %, что является наилучшим достижимым показателем для измерительных приборов переменного тока. По другим показателям электродинамические приборы близки к электромагнитным. Электродинамические приборы используются как образцовые лабораторные низкочастотные высокого класса точности измерительные приборы.

Класс точности 0,1–0,2, потребляемая мощность  $P_{\text{собр}} = 1$  Вт, частотный диапазон 0–5 кГц.

### *Электростатические приборы*

Действие прибора основано на использовании силы, возникающей между пластинами воздушного конденсатора, заряды на которых имеют разные знаки. Схематический чертеж электростатического прибора представлен на рис. 15.6.

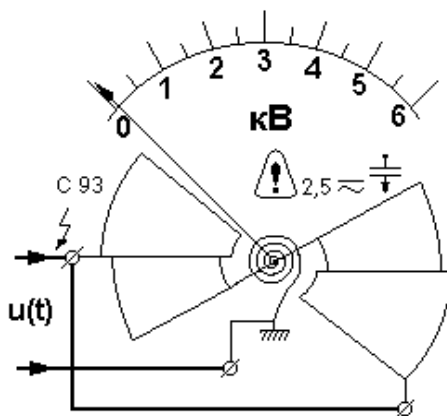


Рис. 15.6. Принцип действия приборов электростатической системы



Измеряемое напряжение  $u(t)$  прикладывается к неподвижным и подвижным пластинам, которые под действием указанной силы втягиваются в пространство между неподвижными пластинами. Вращающий момент пропорционален квадрату напряжения и поэтому содержит постоянную и переменную составляющие. Ограничение движения (как и в других электромеханических системах) осуществляется за счет пружинки. Достоинства этих приборов: широкий частотный диапазон (до 30 МГц) и малая мощность, потребляемая из измерительной цепи. Приборы измеряют среднее квадратическое значение напряжения.

Уравнение отклонения рамки записывается в виде

$$\alpha = \frac{1}{2W} U^2 \frac{dc}{d\alpha};$$

$$U^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt,$$

где  $C$  – емкость между пластинами.

Устройство и принцип действия электростатического прибора говорят о том, что электростатическим прибором может быть только вольтметр, обеспечивающий измерение постоянного напряжения и действующего значения переменного напряжения. Электростатический вольтметр выделяется среди вольтметров всех систем, в том числе и электронных, своим экстремально высоким сопротивлением, которое при измерении постоянного напряжения равно сопротивлению изоляции. При измерении переменного напряжения собственное сопротивление электростатического вольтметра определяется его емкостью, не превышающей нескольких сот пикофард.

Основным недостатком вольтметров электростатической системы является низкий вращающий момент, из-за чего диапазон измеряемых напряжений ограничен снизу значением 30 В, и приборы могут применяться только при условии защиты от вибраций и тряски.

С другой стороны, вольтметры электростатической системы обеспечивают измерение высоких напряжений до 300 кВ без использования делителя напряжения и практически без собственного потребления мощности от объекта. Класс точности 0,5–1,5, потребляемая мощность  $P_{\text{соб}} \leq 1$  мВт, частотный диапазон 0–30 МГц.

## *Средства расширения пределов измерения*

Расширение пределов измерения приборов – это важная технико-экономическая задача, целью которой является уменьшение объема приборного парка предприятия без ущерба для метрологического обеспечения испытаний изделий и управления технологическими процессами. При наличии средств расширения пределов измерения оказывается возможным применять один и тот же дорогостоящий прибор для измерения величин различного размера. В конкретных ситуациях может потребоваться изменить предел измерения в сторону увеличения верхнего предела измерений, т. е. уменьшить чувствительность прибора, а в других случаях, наоборот, – повысить чувствительность, т. е. изменить предел измерения в сторону уменьшения верхнего предела измерения. Возможны два варианта решения этой задачи.

В первом варианте средства расширения пределов измерения встраиваются в измерительный прибор, который снабжается ручным переключателем пределов.

Во втором варианте используются внешние средства расширения пределов измерений. Такое внешнее средство расширения пределов измерения есть не что иное, как *масштабирующий линейный измерительный преобразователь*, который изменяет не вид измеряемой величины, а лишь ее масштаб.

В качестве внешних средств расширения пределов измерения используются:

– шунты – для расширения пределов измерения силы тока в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, т. е. для уменьшения чувствительности;

– делители напряжения и добавочные сопротивления – для расширения пределов измерения напряжения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, т. е. для уменьшения чувствительности;

– усилители тока и напряжения – для расширения пределов измерения тока или напряжения в сторону уменьшения максимального значения измеряемой величины, т. е. для увеличения чувствительности;

– измерительные трансформаторы тока и напряжения – могут применяться для расширения пределов измерения тока или напря-

жения в обе стороны, но чаще всего применяются для расширения пределов измерения в сторону увеличения максимального значения измеряемой величины, т. е. для уменьшения чувствительности.

### Шунты

Схема соединения однопредельного амперметра с шунтом показана на рис. 15.7.

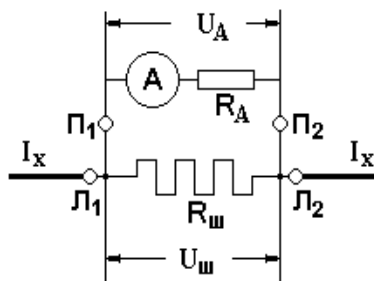


Рис. 15.7. Соединение амперметра с шунтом

Шунт имеет четыре зажима. Зажимы Л<sub>1</sub> и Л<sub>2</sub> называются *токовыми зажимами*, к ним подключается линия с измеряемым током. Два других зажима П<sub>1</sub> и П<sub>2</sub> – *потенциальные*, к ним подключается амперметр, собственное сопротивление которого показано на рисунке и обозначено через R<sub>A</sub>. Потенциальные зажимы жестко соединены между определенными

точками шунта путем сварки или другими методами, обеспечивающими высокую стабильность расположения этих точек и пренебрежимо малое и стабильное переходное сопротивление от этих точек к потенциальным зажимам.

Непосредственное присоединение амперметра к токовым зажимам недопустимо, поскольку в этом случае нестабильность сопротивления контактов в токовых зажимах из-за различных усилий при винтовом соединении и попадания грязи и пыли при большой силе тока будет вызывать соответствующую нестабильность падения напряжения на этих контактах и погрешность измерения, которая не может быть гарантирована изготовителями амперметра и шунта и не может быть определена при измерении.

Сопротивление шунта между точками присоединения потенциальных зажимов обозначено через R<sub>ш</sub>.

Пусть I<sub>A</sub> – ток полного отклонения стрелки, соответствующий верхнему пределу диапазона измерения амперметра А, а U<sub>A</sub> – падение напряжения на сопротивлении амперметра при этом токе:

$$U_A = I_A R_A.$$

Пусть  $I_{\max}$  – верхний предел диапазона измерения силы тока, который желательно обеспечить с помощью шунта.

Очевидно, что при этой силе тока должно выполняться равенство

$$I_A R_A = (I_{\max} - I_A) R_{\text{ш}},$$

откуда получаем значение масштабного коэффициента расширения предела измерения силы тока:

$$K = \frac{I_{\max}}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{\text{ш}}}.$$

Всегда  $K > 1$ .

### *Добавочные сопротивления*

Для расширения пределов измерения напряжения могут использоваться делители напряжения и добавочные сопротивления. Однако из-за того, что делитель напряжения должен потреблять от объекта ток, превышающий ток собственного потребления вольтметра, на практике для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные сопротивления. Исключение составляет только электростатический вольтметр, который практически не потребляет ток, и с ним могут использоваться делители напряжения, составленные из активных сопротивлений или конденсаторов.

Добавочное сопротивление последовательно соединяется с вольтметром. Если собственное сопротивление вольтметра  $R_{\text{в}}$ , а значение добавочного сопротивления  $R_{\text{д}}$ , то при подключении к вольтметру добавочного сопротивления верхний предел измерения увеличивается до напряжения

$$U_{\max} = I_{\text{в max}} (R_{\text{в}} + R_{\text{д}}),$$

где  $I_{\text{в max}}$  – ток полного отклонения стрелки вольтметра.

Поэтому коэффициент расширения предела измерения

$$K = \frac{I_{\text{в max}} (R_{\text{в}} + R_{\text{д}})}{I_{\text{в max}} R_{\text{в}}} = 1 + \frac{R_{\text{д}}}{R_{\text{в}}}.$$

Всегда  $K > 1$ .

### *Измерительные трансформаторы тока*

Измерительные трансформаторы тока применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного тока и имеют существенное преимущество перед шунтами, которое заключается в том, что при их применении отсутствует гальваническая связь между первичной обмоткой, включенной в мощную электрическую цепь объекта, и вторичной обмоткой. Разрыв этой гальванической связи способствует обеспечению безопасности персонала, снижению действия помех и облегчает выполнение необходимых соединений во вторичной цепи. Кроме того, в ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и мало зависит от внешних влияющих факторов. Схема включения измерительного трансформатора

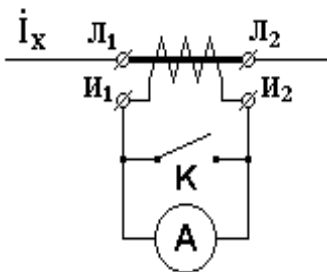


Рис. 15.8. Измерительный трансформатор тока

тока в линию с измеряемым током  $I_x$  и присоединения амперметра ко вторичной обмотке представлена на рис. 15.8. На этом рисунке  $L_1$  и  $L_2$  – зажимы первичной обмотки трансформатора, к которым подключена линия,  $I_1$  и  $I_2$  – зажимы вторичной обмотки, к которым подключается амперметр,  $K$  – ключ, замыкающий вторичную обмотку.

Как известно, опасным режимом для трансформатора тока является режим холостого хода, при котором на вторичной обмотке развивается высокое напряжение и возможен пробой изоляции. Напротив, благоприятным режимом для трансформатора тока является режим короткого замыкания вторичной обмотки. В связи с этим

чрезвычайно важно выполнять правила включения трансформатора тока в линию с амперметром.

Коэффициент преобразования трансформатора тока в ограниченном диапазоне частот равен отношению числа витков обмоток трансформатора и может быть как больше, так и меньше единицы.

### *Измерительные трансформаторы напряжения*

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения характеристик переменного напряжения. Применение измерительных трансформаторов напряжения дает те же преимущества перед применением добавочных сопротивлений, что и применение трансформаторов тока. В ограниченном частотном диапазоне коэффициент преобразования (масштабирования) определяется только отношением числа витков обмоток трансформатора и практически не зависит от действия внешних влияющих факторов. С увеличением частоты сверх этого диапазона начинают расти погрешности передачи амплитуды и фазы измеряемого напряжения. Схемы соединений трансформатора напряжения с участком электрической цепи и с вольтметром во вторичной обмотке особенностей не имеют.

### *Аналоговые электронные вольтметры*

При измерении напряжения методом непосредственной оценки вольтметр подключается параллельно участку исследуемой цепи. Для уменьшения методической погрешности измерения собственное потребление вольтметра должно быть мало, а его входное сопротивление велико. Поэтому в последние годы в основном используются электронные вольтметры. Электронные вольтметры представляют собой сочетание электронного преобразователя и измерительного прибора. В отличие от вольтметров электромеханической группы электронные вольтметры постоянного и переменного токов имеют высокие входное сопротивление и чувствительность, широкие пределы измерения и частотный диапазон (от 20 Гц до 1000 МГц), малое потребление тока из измерительной цепи.

Электронные вольтметры классифицируют по ряду признаков:

- по назначению – вольтметры постоянного, переменного и импульсного напряжений; универсальные, фазочувствительные, селективные;
- способу измерения – приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
- характеру измеряемого значения напряжения – амплитудные (пиковые), среднего квадратического значения, средневывпрямленного значения;
- частотному диапазону – низкочастотные, высокочастотные, сверхвысокочастотные.

Кроме того, все электронные приборы можно разделить на две большие группы: аналоговые электронные со стрелочным отсчетом и приборы дискретного типа с цифровым отсчетом.

В соответствии с общепринятыми обозначениями отечественным электронным вольтметрам присваивается индекс В. Например, ВК7-16А – вольтметр комбинированный (К) – может измерять сопротивление; 7 – универсальный на постоянный и переменный ток; 16 – номер разработки; А – модификация. Вольтметры постоянного тока имеют индексацию В2, а вольтметры переменного тока – В3.

При измерениях силы тока электронным вольтметром вначале ток преобразуется в напряжение, а затем определяется по формуле

$$I_x = U_x / R_0.$$

### *Структурные схемы аналоговых электронных вольтметров*

Структурная схема аналогового электронного вольтметра прямого преобразования соответствует типовой схеме, изображенной на рис. 15.9, в самом общем случае включает входное устройство, на вход которого подается измеряемое напряжение  $U_x$ , измерительный преобразователь и магнитоэлектрический прибор, применяемый в качестве измерительного устройства.

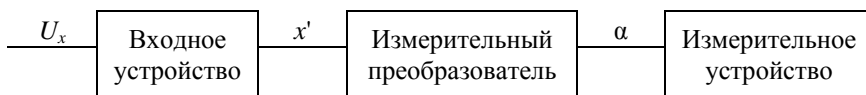


Рис. 15.9. Обобщенная структурная схема аналогового вольтметра прямого преобразования

В простейшем случае входное устройство представляет делитель измеряемого напряжения – аттенуатор, с помощью которого расширяются пределы измерения вольтметра. Помимо точного деления  $U_x$  входное устройство не должно снижать входной импеданс вольтметра, влияющий, как уже неоднократно подчеркивалось, на методическую погрешность измерения  $U_x$ . Таким образом, использование входного устройства в виде аттенуатора является, в дополнение к добавочным сопротивлениям и измерительным трансформаторам напряжения, еще одним способом расширения пределов измерения вольтметров. Именно этот способ применяется в электронных вольтметрах и других радиоизмерительных приборах.

Структурная схема аналогового электронного вольтметра постоянного тока соответствует обобщенной схеме рис. 15.9. Основным функциональным узлом таких вольтметров является усилитель постоянного тока. В настоящее время аналоговые электронные вольтметры постоянного тока находят ограниченное применение, так как они по своим техническим свойствам сильно уступают цифровым вольтметрам переменного тока. Поэтому дальше рассматриваются только аналоговые вольтметры переменного тока.

Вольтметры переменного и импульсного тока в зависимости от назначения могут проектироваться по одной из двух структурных схем (рис. 15.10), различающихся типом измерительного преобразователя. В вольтметрах первой модификации (рис. 15.10, *а*) измеряемое напряжение  $U_x$  преобразуется в постоянное напряжение  $U_x$ , которое затем измеряется вольтметром постоянного тока. Наоборот, в вольтметрах второй модификации (рис. 15.10, *б*) измеряемое напряжение сначала усиливается с помощью усилителя переменного тока, а затем детектируется и измеряется. При необходимости между детектором и измерительным устройством может быть дополнительно включен усилитель переменного тока.

Сравнивая структурные схемы на рис. 15.10, можно еще до рассмотрения схемных решений их функциональных узлов сделать определенные выводы в отношении свойств вольтметров обеих модификаций. В частности, вольтметры первой модификации в отношении диапазона частот измеряемых напряжений не имеют таких ограничений, как вольтметры второй модификации, где этот параметр зависит от полосы пропускания усилителя переменного тока. Зато вольтметры второй модификации имеют высокую чувствитель-



ность. С помощью усилителя переменного тока можно получить значительно больший коэффициент усиления, чем с помощью усилителя постоянного тока, т. е. проектировать микровольтметры, у которых нижний предел  $U_x$ - ограничивается собственными шумами усилителя. За счет изменения коэффициента деления входного устройства и коэффициента усиления усилителей диапазон измеряемых напряжений может быть большим у вольтметров обеих модификаций.

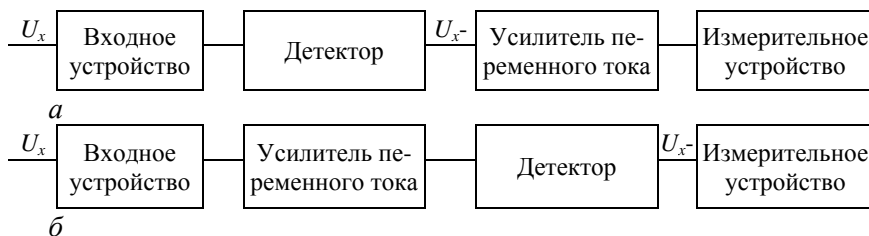


Рис. 15.10. Структурные схемы аналоговых вольтметров переменного и импульсного тока:

$a$  – с детектором на входе;  $b$  – с усилителем переменного тока на входе

Детекторы можно классифицировать по функции преобразования входного напряжения в выходное: амплитудные (пиковые), среднего квадратического и средневыпрямленного значения. Тип детектора во многом определяет свойства прибора:

вольтметры с амплитудными детекторами являются самыми высокочастотными;

вольтметры с детекторами среднего квадратического значения позволяют измерять напряжение любой формы;

вольтметры средневыпрямленного значения измеряют только гармонические сигналы, но являются самыми простыми и надежными.

*Амплитудный детектор* – устройство, напряжение на выходе которого, т. е. на нагрузке, соответствует максимальному (амплитудному) значению измеряемого напряжения.

Одним из достоинств аналоговых вольтметров с амплитудным детектором является независимость показаний прибора от формы сигнала. Обычно шкала амплитудных вольтметров градуируется в средних квадратических значениях синусоидального напряжения, т. е. показания прибора:

$$U_{\text{пр}} = -U_m / K_a.$$

Диодные амплитудные детекторы при малых напряжениях вносят в измеряемый сигнал значительные нелинейные искажения. Поэтому в последние годы в измерительных устройствах применяют амплитудные детекторы на интегральных микросхемах – операционных усилителях – ОУ.

*Детектор среднего квадратического значения* – преобразователь переменного напряжения в постоянное, пропорциональное корню квадратному из среднего квадрата мгновенного значения напряжения. Значит, измерение действующего напряжения связано с выполнением трех последовательных операций: возведение в квадрат мгновенного значения сигнала, усреднение и извлечение корня из результата усреднения (последняя операция обычно осуществляется при градуировке шкалы вольтметра). Возведение в квадрат мгновенного значения, как правило, производят ячейкой с полупроводниковым элементом путем использования квадратичного участка его характеристики; иногда этот участок создается искусственно.

*Детектор средневыпрямленного значения* – устройство, преобразующее переменное напряжение в постоянный ток, пропорциональный средневыпрямленному значению напряжения. Структура выходного тока измерительного прибора с детектором средневыпрямленного значения аналогична ранее рассмотренному узлу выпрямительной системы, и поэтому их свойства во многом идентичны (зависимость от формы сигнала, частотные характеристики, класс точности). Аналоговый электронный вольтметр средневыпрямленного значения имеет более высокую чувствительность и меньшее потребление мощности от измерительной цепи (за счет дополнительного усиления), чем прибор со схемой выпрямления.

### ***Цифровые вольтметры***

По виду измеряемой величины цифровые вольтметры делятся на вольтметры постоянного тока, переменного тока (средневыпрямленного или среднего квадратического значения), импульсные вольтметры для измерения параметров видео- и радиоимпульсных сигналов и универсальные вольтметры, предназначенные для измерения напряжения постоянного и переменного тока, а также ряда других электрических и неэлектрических величин (сопротивления, температуры и прочее).

Принцип работы цифровых измерительных приборов основан на дискретном и цифровом представлении непрерывных измеряемых величин. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра приведена на рис. 15.11. Схема состоит из входного устройства, АЦП, цифрового отсчетного устройства и управляющего устройства.

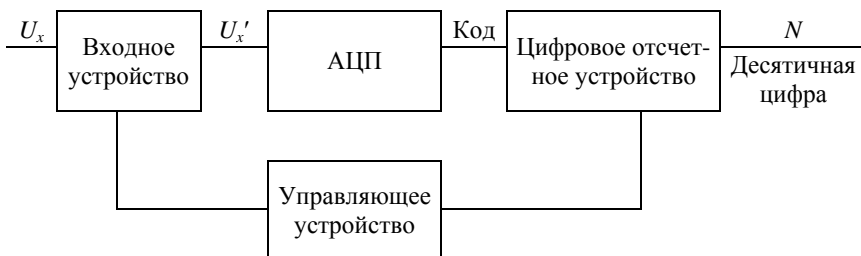


Рис. 15.11. Упрощенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство содержит делитель напряжения. В вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный.

АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представляемый цифровым кодом. Процесс аналого-цифрового преобразования составляет сущность любого цифрового прибора, в том числе и вольтметра. Использование в АЦП цифровых вольтметров двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчетным устройством.

Цифровое отсчетное устройство измерительного прибора регистрирует измеряемую величину. Управляющее устройство объединяет и управляет всеми узлами вольтметра.

По типу АЦП цифровые вольтметры могут быть разделены на четыре основные группы:

- 1) кодоимпульсные (с поразрядным уравниванием);
- 2) времяимпульсные;
- 3) частотно-импульсные;
- 4) пространственного кодирования.

В настоящее время цифровые вольтметры чаще строятся на основе кодоимпульсного и времяимпульсного преобразования.

АЦП вольтметров преобразуют сигнал постоянного тока в цифровой код, поэтому и цифровые вольтметры также считаются при-

борами постоянного тока. Для измерения напряжения переменного тока на входе вольтметра ставится преобразователь переменного напряжения в постоянное, чаще всего это детектор средневыпрямленного значения.

Основные технические характеристики цифровых вольтметров постоянного тока:

- диапазон измерения: 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В;
- порог чувствительности (уровень квантования амплитуды напряжения или единица дискретности) на диапазоне напряжения в 100 мВ может быть 1 мВ, 10 мкВ;
- количество знаков (длина цифровой шкалы) – отношение максимальной измеряемой величины на этом диапазоне к минимальной. Диапазону измерения 100 мВ при уровне квантования 10 мкВ соответствуют 104 знака;
- входное сопротивление электрической схемы очень высокое, обычно более 100 МОм;
- помехозащищенность – так как цифровые вольтметры обладают высокой чувствительностью, очень важно обеспечить хорошую помехозащищенность.

В кодоимпульсных цифровых вольтметрах (вольтметрах с поразрядным уравниванием) реализуется принцип компенсационного метода измерения напряжения. Упрощенная структурная схема такого вольтметра представлена на рис. 15.12.

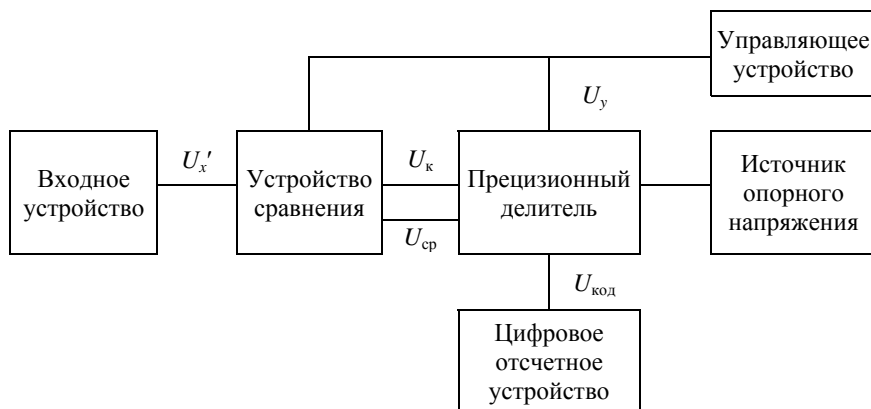


Рис. 15.12. Упрощенная структурная схема кодоимпульсного вольтметра

Измеряемое напряжение  $U_x'$ , полученное с входного устройства, сравнивается с компенсирующим напряжением  $U_k$ , вырабатываемым прецизионным делителем и источником опорного напряжения. Компенсирующее напряжение имеет несколько уровней, квантованных в соответствии с двоично-десятичной системой счисления. Например, двухразрядный цифровой вольтметр, предназначенный для измерения напряжений до 100 В, может включать следующие уровни напряжений: 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В.

Сравнение измеряемого  $U_x'$  и компенсирующего  $U_k$  напряжений производится последовательно по командам управляющего устройства. Управляющие импульсы  $U_y$  через определенные интервалы времени переключают сопротивления прецизионного делителя таким образом, что на выходе делителя последовательно возникают значения напряжения 80, 40, 20, 10, 8, 4, 2, 1 В; одновременно к соответствующему выходу прецизионного делителя подключается устройство сравнения.

Если  $U_k > U_x'$ , то с устройства сравнения поступает сигнал  $U_{cp}$  на отключение в делителе соответствующего звена так, чтобы снять сигнал  $U_k$ . Если  $U_k < U_x'$ , то сигнал с устройства сравнения не поступает. После окончания процесса сравнения полученный сигнал  $U_{код}$  положения ключей прецизионного делителя и является тем кодом, который считывается цифровым отсчетным устройством.

Для аналогового напряжения с амплитудой 63 В код, соответствующий этому сигналу, будет 01100011.

Процесс измерения напряжения в кодоимпульсном приборе напоминает взвешивание на весах, поэтому приборы иногда называют поразрядно-уравновешивающими. Точность кодоимпульсного прибора зависит от стабильности опорного напряжения, точности изготовления делителя и порога срабатывания сравнивающего устройства.

Сейчас более широкое распространение получили приборы времяимпульсного типа.

Структурная схема и диаграмма, поясняющие работу прибора с времяимпульсным преобразованием, показаны на рис. 15.13.

Прибор работает следующим образом. Генератор пилообразного напряжения ГЛИН вырабатывает напряжение (на рисунке обозначено  $U_k$ ) с нормированной частотой. В устройстве сравнения напряжение  $U_k$  сравнивается с измеряемым напряжением  $U_x$ . В моменты

совпадения напряжений формируются (см. диаграмму) импульсы  $\Delta t$ , определяющие интервалы времени, в течение которых будет производиться измерение. Далее эти интервалы «заполняются» импульсами с генератора счетных импульсов. Количество импульсов  $N$  за интервал времени  $\Delta t$  подсчитывается счетчиком импульсов и отображается в отсчетном устройстве. Таким образом, чем больше измеряемое напряжение, тем больше интервал времени  $\Delta t$  и количество импульсов  $N$ . (Число импульсов  $N$  прямо пропорционально напряжению  $U_x$ .)

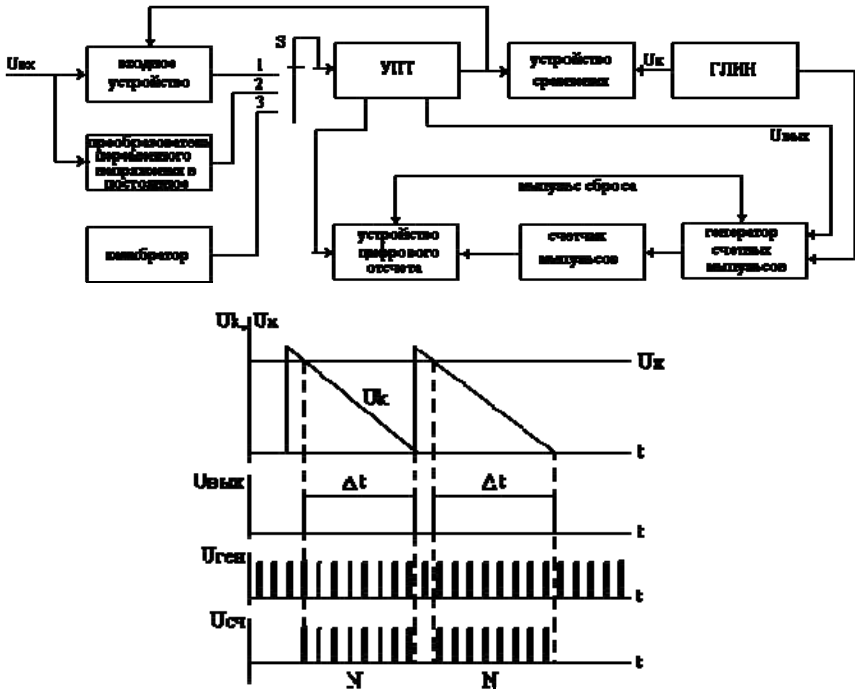


Рис. 15.13. Структурная схема и диаграмма прибора с времяимпульсным преобразованием:  
 УПТ – усилитель постоянного тока;  
 ГЛИН – генератор линейно изменяющегося напряжения

Измеряемая величина

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T [U_x - U_{ном}(t)] dt = \frac{1}{T} \int_0^T [U_x + U_{мах.ном} \sin \omega t] dt = U_x.$$

Схема и диаграмма, поясняющие работу приборов с частотно-импульсным преобразованием, показаны на рис. 15.14.

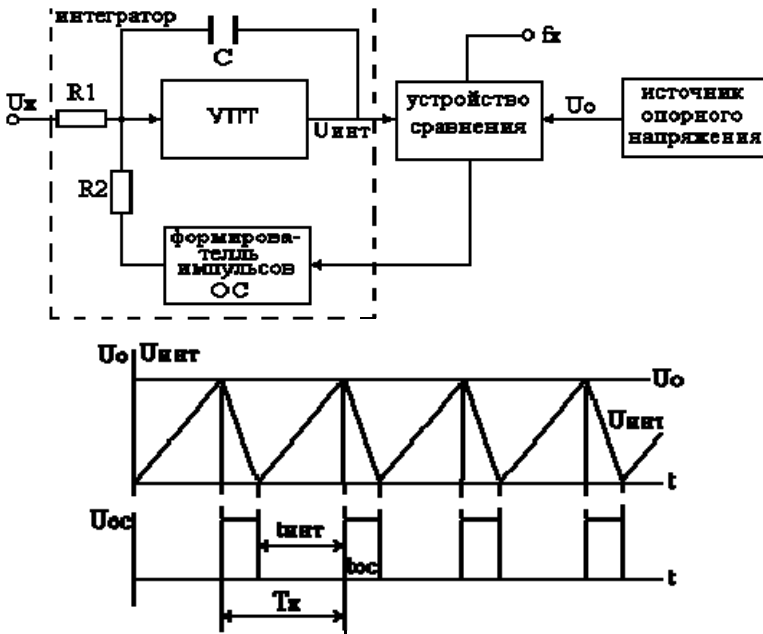


Рис. 15.14. Структурная схема и диаграмма прибора с частотно-импульсным преобразованием

Схема работает следующим образом. При подаче на вход интегратора напряжения  $U_x$  на его выходе формируется линейно нарастающее напряжение. Скорость нарастания сигнала  $U_{инт}$  зависит от величины входного напряжения: чем больше напряжение, тем с большей скоростью нарастает сигнал. В устройстве сравнения напряжение  $U_{инт}$  сравнивается с образцовым напряжением  $U_0$ . В момент равенства напряжений формируется импульс обратной связи, который запускает схему сброса интегратора и действует до тех пор, пока напряжение на выходе интегратора не обнулится.

Очевидно, чем больше входное напряжение, тем больше частота следования импульсов. Частота импульсов  $f_x$  прямо пропорциональна входному напряжению. В приведенной схеме не контролируется процесс разряда интегратора, что приводит к погрешности преобразования  $U_x - f_x$ .

## **Порядок выполнения работы**

1. Получить допуск к работе.
2. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить синусоидальный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трех вольтметрах: электронном ВЗ-38, В7-27 и электромеханическом Ц4331. Контроль сигнала осуществлять осциллографом С 1-137.
3. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить синусоидальный сигнал частотой 500 кГц и снять показания на трех вольтметрах.
4. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить пилообразный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трех вольтметрах.
5. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить пилообразный сигнал частотой 500 кГц и снять показания на трех вольтметрах.
6. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить прямоугольный сигнал частотой 50 Гц и снять показания на трех вольтметрах.
7. На генераторе сигналов специальной формы Г6-29 выставить прямоугольный сигнал частотой 500 кГц и снять показания на трех вольтметрах.
8. Произвести анализ результатов, дать объяснение различия показаний приборов.

## **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблица с полученными значениями измерений.
4. Выводы по проделанной работе.

## **Список литературы**

1. Электрические измерения : учебник для вузов / А. В. Фремке [и др.]; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – 5-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергия; Ленингр. отд-ние, 1980. – 392.
2. Андреев, Т. Н. Теория механизмов и детали точных приборов / Т. Н. Андреев. – Москва : Машиностроение, 1987.



## Лабораторная работа № 16

### ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

#### Цель работы

1. Изучить интерференционный метод измерения частоты.
2. Изучить принцип действия индукционного первичного измерительного преобразователя.
3. Определить число оборотов электродвигателя.

#### Инструменты и принадлежности

1. Собранный установкой с индуктивным первичным преобразователем.
2. Генератор сигналов низкочастотный.
3. Частотомер.
4. Осциллограф.

#### Общие сведения

Измерительные устройства, предназначенные для измерения угловой скорости вращения вала, называются *тахометрами*. В большинстве случаев они представляют собой электромеханические датчики, которые преобразуют механическое вращательное движение непосредственно в электрический сигнал.

Для измерения частоты вращения вала используются физические явления, в которых скорость вращения связана определенной зависимостью с какой-либо легко определяемой величиной.

Для определения частоты вращения используют следующие основные методы:

- прямого преобразования;
- сравнения;
- частотный.

**Метод прямого преобразования** основан на преобразовании частоты вращения машины в электрический сигнал, давление, центробежную силу и др. Используемые в этом случае магнитные, магнитоэлектрические, центробежные, гидравлические и пневматические

тахометры, как правило, просты по конструкции, но имеют невысокий класс точности. Последнее связано с тем, что используемые тахометры нагружают испытуемый механизм (машину) добавочным тормозным моментом. Поэтому для испытания микромашин их применять не рекомендуется.

Работа *центробежного тахометра* (рис. 16.1) основана на квадратической зависимости центробежных сил от частоты вращения инерционной массы. Он состоит из инерционных масс 4, шарнирно соединенных с неподвижным 1 и подвижным 2 фланцами, зубчатой рейки (сектора) 5, которая соединена поводком с подвижным фланцем. Рейка входит в зацепление с трибом, на котором установлена стрелка 6. При вращении приводного вала 3 машины под действием сил инерции массы расходятся в радиальном направлении. Подвижный фланец вдоль вала перемещается к неподвижному фланцу. Его свободному перемещению препятствует силовая пружина, имеющая заданные упругие свойства. Через поводок перемещение подвижного фланца передается на зубчатую рейку и затем через триб на стрелку.

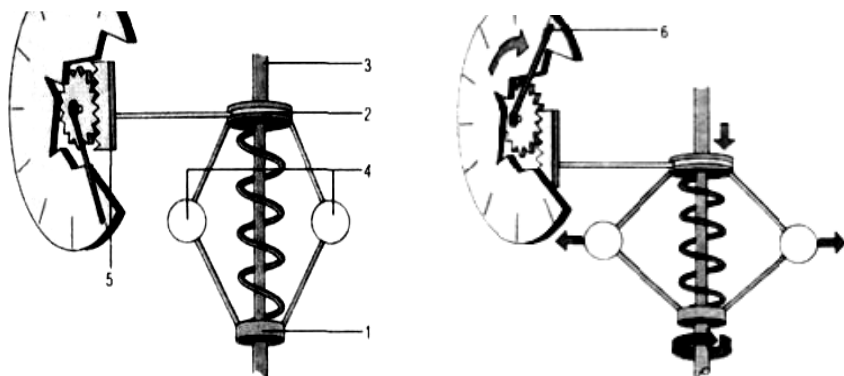


Рис. 16.1. Центробежный тахометр

*Магнитный тахометр* (рис. 16.2) состоит из постоянного магнита 1, вращающегося с валом испытуемой машины, и чувствительного элемента в виде немагнитного поворотного статора 2, соединенного с пружиной 3 и стрелкой, установленной на валу 4. При вращении магнита в обмотке статора наводится ЭДС и протекает ток, пропорциональный частоте вращения. Взаимодействие тока статора

с полем постоянного магнита приводит к появлению пропорционального частоте вращения вращающего момента, под действием которого закручивается пружина и отклоняется стрелка указателя тахометра. В качестве модификации магнитных тахометров применяются дистанционные магнитные тахометры.

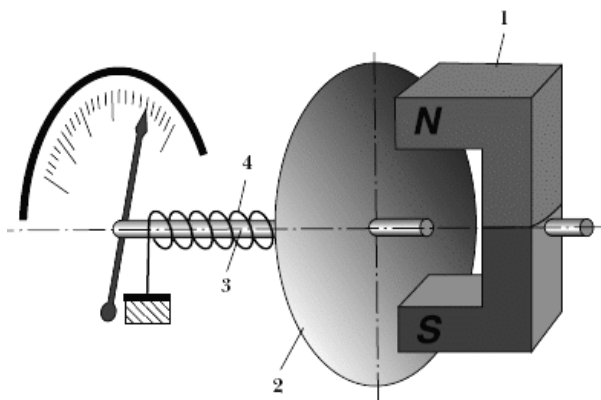


Рис. 16.2. Магнитный тахометр

В электрических тахометрах измеряемая угловая скорость преобразуется в постоянный, переменный или импульсный ток. В зависимости от рода тока и преобразователя можно выделить электромашинные тахометры постоянного и переменного тока, электроимпульсные емкостные тахометры и счетно-импульсные тахометры.

*Тахометр с электрическим генератором* (тахогенератором) представляет собой сочетание генератора постоянного или переменного и вторичного электроизмерительного прибора.

У электрических тахометров постоянного тока характеристика линейная, а у тахометров переменного тока – нелинейная. Тем не менее более широкое применение получили электромашинные тахометры переменного тока. Их основное преимущество перед тахометрами постоянного тока состоит в том, что генератор переменного тока не имеет коллектора, благодаря чему в процессе длительной работы тахометр лучше сохраняет свою первоначальную точность.

Тахометры с электрическими генераторами в отличие от центробежных и магнитных дают возможность дистанционной передачи по-

казаний, так как вторичный прибор может быть удален на значительное расстояние от места измерения. Дистанционный электрический тахометр представляет собой сочетание синхронной передачи и указателя, аналогичного магнитоиндукционному тахометру (рис. 16.3).

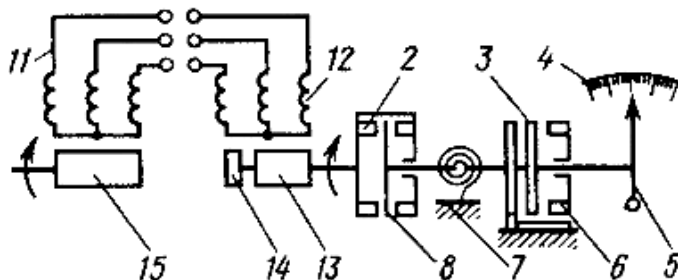


Рис. 16.3. Электрический тахометр

Датчиком синхронной передачи служит трехфазный генератор 15 с ротором в виде постоянного магнита. При вращении ротора в обмотках 12 статора возникает переменный ток, частота которого соответствует угловой скорости ротора. Датчик трехпроводной линией 11 связан с приемником 13, в котором имеется синхронный электродвигатель. Для улучшения пусковых характеристик в роторе электродвигателя кроме постоянных магнитов установлены три стальных диска 14. Магниты 3 посажены на ось ротора свободно и связаны с ней через пружину. Это обеспечивает быстрый переход вращения ротора электродвигателя из асинхронного в синхронный режим. На конце вала электродвигателя укреплен магнитный узел 2, содержащий шесть пар полюсов постоянных магнитов, между которыми расположен металлический диск 8 подвижной части указателя. В результате взаимодействия вращающегося магнитного узла с вихревыми токами в металлическом диске возникнет вращающий момент, пропорциональный измеряемой скорости. На одной оси с диском расположены противодействующая спиральная пружина 7, индукционный успокоитель 6 и стрелка 4 указателя прибора 5.

Дистанционные магнитные тахометры обладают достаточно высокой точностью (погрешность не более 0,2–0,5 %), имеют равномерную шкалу, достаточно надежны в работе.

*Гидравлический тахометр* (рис. 16.4) состоит из диска 2 с радиальными и осевыми каналами, заключенного в герметичную камеру, заполненную жидкостью. При вращении диска давление в камере 1 повышается пропорционально частоте вращения. Величина давления подается к приемнику 3.

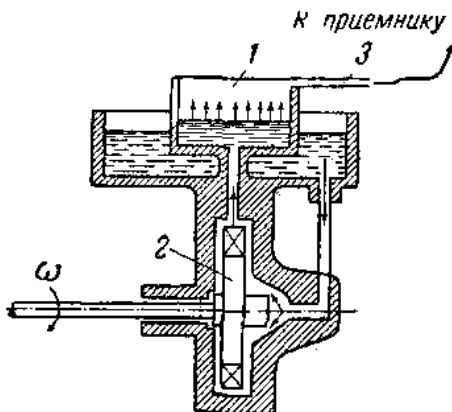


Рис. 16.4. Гидравлический тахометр

*Пневматический тахометр* состоит из центробежного вентилятора, вращающегося в конусе с кольцевой перегородкой. В кольцевой перегородке сделано окно, в котором установлена либо пластина, связанная со стрелкой и спиральной пружиной, либо манометр. Угол отклонения пластины пропорционален давлению воздушного потока, т. е. угловой скорости вентилятора.

К недостаткам механических тахометров (центробежные, гидравлические, пневматические) следует отнести нелинейность шкалы, что увеличивает погрешность при их градуировке.

**Метод сравнения** основан на сопоставлении измеряемой частоты вращения с эталонной и позволяет получить более высокую точность измерения, чем метод прямого преобразования. При использовании этого метода применяют фрикционные, стробоскопические и вибрационные тахометры.

Во *фрикционных тахометрах* (рис. 16.5) сравнение измеряемой и эталонной частоты вращения осуществляется путем изменения передаточного отношения встроенного вариатора. Через зубчатую пе-

редачу 1–2 электродвигатель вращает диск 3 с постоянной угловой скоростью  $\Omega$ . Диск приводит во вращение ролик 4. Угловая скорость ролика будет пропорциональна угловой скорости диска и расстоянию от ролика до оси вращения диска и обратно пропорциональна радиусу ролика. Если скорости винта 5 и ролика 4 неодинаковы, ролик будет перемещаться вдоль винта. Направление перемещения таково, что скорость ролика будет приближаться к скорости винта. При установившейся скорости винта ролик займет такое положение, при котором его скорость будет равна скорости винта:  $\omega_a = \omega_p$ .

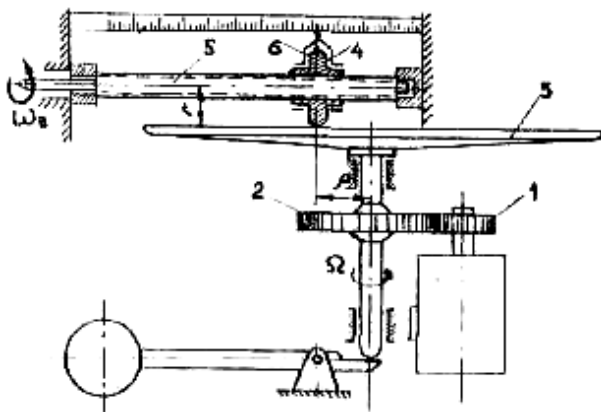


Рис. 16.5. Фрикционный тахометр

Соединенный с роликом указатель по шкале будет показывать величину измеряемой угловой скорости.

Погрешность фрикционных тахометров определяется в основном стабильностью частоты вращения эталонного двигателя и обычно не превышает 0,5 %.

*Стробоскопические тахометры* состоят из лампы-вспышки, питающейся от регулируемого источника стабилизированной частоты, и измерительного устройства. Эти тахометры позволяют проводить измерения бесконтактным способом, но дистанционное измерение частоты вращения затруднительно. Определение частоты вращения испытуемой машины следует начинать с заведомо более высокой частоты вращения по сравнению с измеряемой. Если же производить измерения в обратном порядке, то возможна ошибка, поскольку

стробоскопический эффект получается как при истинной, так и при кратной ей частоте вращения:

$$\omega = \omega_n k,$$

где  $k$  – целое число.

Чувствительным элементом *вибрационного тахометра* является ряд упругих стальных полос, закрепленных одним концом, каждая из которых настроена на определенную собственную частоту колебаний. Настройка достигается за счет изменения толщины или длины пластин, а также за счет изменения величины масс на свободных концах полосок. Для измерения скорости вала какой-либо машины или станка тахометр крепится к станине или кожуху машины. При вращении вала возникает вибрация частей машины; эта вибрация передается основанию тахометра; при этом возбуждаются резонансные колебания одной-двух полосок, собственные частоты которых близки к частоте вибраций машины.

**Частотный метод** основан на измерении частоты электрических импульсов, получаемых от таходатчиков. Частотный метод измерения исключает возможность внесения датчиком или линией передачи (при дистанционном измерении) дополнительных погрешностей, связанных с изменением температуры, давления, влажности и пр.

Одним из достоинств частотного метода является возможность с помощью датчика существенно увеличить частоту импульсов, не допуская при этом дополнительной погрешности. Это особенно важно при измерении низкой частоты вращения, когда прямые методы преобразования дают значительные погрешности.

При использовании частотного метода измерения частоты вращения машины применяют следующие типы таходатчиков: индукционные, индуктивные, емкостные и фотоэлектрические.

*Индукционные таходатчики* бывают двух типов — с активным и пассивным ротором. В первом случае в качестве ротора используется постоянный магнит с числом полюсов, определяемым необходимым количеством импульсов на один оборот вала электрической машины. В качестве такого таходатчика может быть использован синхронный тахогенератор с возбуждением от постоянных магнитов.

Во втором случае ротор изготавливается из стали в виде звездочки, а на статоре датчика располагаются две обмотки, одна из которых (обмотка возбуждения) подключается к источнику постоянного то-

ка, а другая (генераторная обмотка) — к частотомеру. При вращении ротора магнитный поток из-за изменения магнитной проводимости пульсирует с частотой, пропорциональной произведению скорости электрической машины на число зубцов ротора. В генераторной обмотке наводится переменная ЭДС с частотой пульсаций магнитного потока.

*Емкостный таходатчик* состоит из двух неподвижных обкладок и диска, вращающегося между ними и жестко связанного с валом испытуемой машины. По окружности диска расположены чередующиеся секторы с различной диэлектрической проницаемостью. При прохождении этих секторов между обкладками конденсатора емкость последнего меняется, что приводит к изменению тока в цепи конденсатора, подключенного через балластный резистор к источнику постоянного тока. Частота пульсаций тока пропорциональна произведению частоты вращения испытуемой электрической машины на количество секторов диска. Измерение частоты пульсаций осуществляется, как и в предыдущем случае, с помощью частотомера.

*Фотоэлектрический таходатчик* (рис. 16.6) является бесконтактным. Его принцип действия основан на изменении освещенности рабочей поверхности фотоприемников с частотой, пропорциональной частоте вращения испытуемой электрической машины. Для этого диск 1 с отверстиями, который является модулятором светового потока от источника излучения, устанавливается на свободный конец вала 2. Этот метод измерения также может быть реализован вторым способом. На доступной части ротора наносят (или наклеивают) светоотражающие полосы. Фотоприемники 5 изготовляют, как правило, на базе фоторезисторов, фотодиодов или фототранзисторов. В основном применяют источники излучения 3 тепловые или люминесцентные.

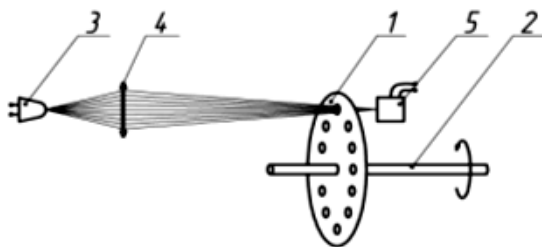


Рис. 16.6. Фотоэлектрический таходатчик



Промышленность выпускает разнообразные ручные фотоэлектрические тахометры, обладающие высокой точностью и малыми габаритами.

### **Интерференционный метод определения частоты вращения вала**

Если проекции движущейся точки на оси координат совершают гармонические колебания по закону

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1);$$

$$x = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2),$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды колебаний;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  – частоты колебаний;

$\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – фазовые углы,

то сама точка на плоскости в этом случае будет совершать движение по кривым, которые называются фигурами Лиссажу или фигурами кратности. Вид кривой зависит от соотношения частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  и разности фаз  $\theta = \varphi_1 - \varphi_2$ . Если частоты совпадают ( $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ), то уравнение движения точки (при исключении времени  $t$ ) будет

$$\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 - A_2} \cos \theta + \frac{y^2}{A_2^2} = \sin \theta,$$

т. е. точка в этом случае движется по эллипсу с центром в начале координат. При разных значениях  $\theta$ ,  $A_1 = A_2$ ,  $\omega_1 = \omega_2$  возможны фигуры, показанные на рис. 16.7.

Если частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  не равны, но кратны целым числам, то получаются более сложные кривые (см. рис. 16.7).

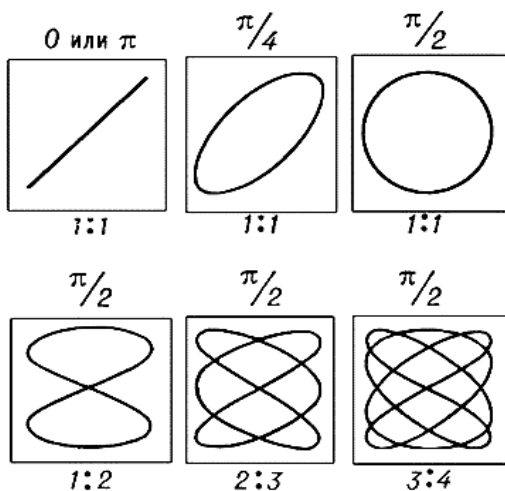


Рис. 16.7. Фигуры Лиссажу при  $A_1 = A_2$ ,  $\omega_1 = \omega_2$ ,  $\theta_1 \neq \theta_2$  с кратностью 1:1 и с различной кратностью частот  $\omega$

Зная кратность фигуры Лиссажу, можно при известной частоте  $\omega_1 = \omega_0$  определить частоту  $\omega_2 = \omega_x$ , т. е. определить, например, скорость вращения вала, ротора электродвигателя и других подвижных элементов механических систем. Измеряя размеры эллипса при одинаковых  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , можно расчетным путем определить угол фазового сдвига между двумя напряжениями, что необходимо при исследовании работы фильтров, усилителей, трансформаторов и других элементов электрических цепей.

### Описание измерительной установки

Принципиальная схема измерительной установки показана на рис. 16.8.

Для сложения проекций движущейся точки используется осциллограф 4, на вертикально отклоняющие пластины которого подается напряжение с частотой  $\omega_x$ , пропорциональной скорости вращения  $n_x$  вала ротора электродвигателя, а на горизонтально отклоняющие – напряжение с частотой  $\omega_0$ , которая может быть изменена и определена с достаточно высокой точностью.

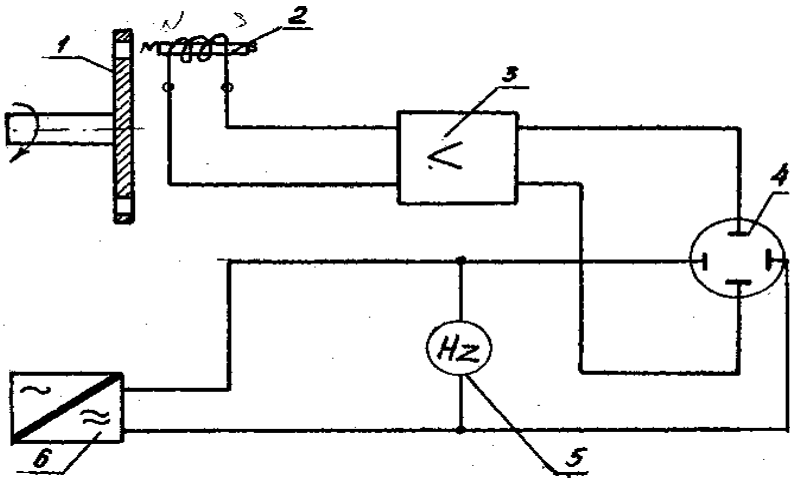


Рис. 16.8. Схема измерительной установки:

1 – диск на валу электродвигателя; 2 – индукционный ПИП; 3 – усилитель (для усиления может быть использован усилитель осциллографа); 4 – осциллограф; 5 – частотомер; 6 – генератор синусоидальных колебаний

На валу электродвигателя установлен диск 1 с числом отверстий  $m$ ; около диска расположен индукционный первичный измерительный преобразователь (ПИП) 2, состоящий из постоянного магнита с катушкой. Во время вращения вала электродвигателя магнитное поле пересекается спицами диска, что изменяет сопротивление в магнитной цепи магнита. Благодаря этому магнитный поток, сцепляющийся с витками катушки, становится переменным, что приводит к наведению переменной ЭДС, частота которой равна частоте пересечения магнитного поля спицами диска. Тогда

$$n_x = \frac{\omega_x}{m} 60, \text{ об/мин.}$$

От генератора 6 напряжение подается на горизонтально отклоняющие пластины. Изменяя частоту  $\omega_0$  генератора, получаем фигуру Лиссажу с определенной кратностью.

Точность измерения частоты интерференционным методом зависит от точности задания частоты  $\omega_0$  генератором 6 и правильности

определения момента равенства или кратности частот. Если в генераторе частоты применяется стабилизация с помощью кварцевого генератора, то погрешность может составлять тысячные доли процента. В данной работе изменение частоты генератора задается изменением емкости колебательного контура. Погрешность в этом случае составляет около 1 %. Повысить точность возможно, если значение  $\omega_0$  устанавливается с помощью частотомера 5, погрешность которого меньше. Если применяется частотомер Ф 5043, то погрешность определения составит  $\pm 0,5$  %, а если частотомер ЧЗ-24, то  $\pm 0,001$  %.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить допуск к работе.
2. Генератор ГЗ-18, частотомер Ф 5043 и осциллограф С1-19БВ включить в сеть.
3. Вращая ручку изменения частоты генератора ГЗ-18, добиться равенства частот генератора и ИПИП (приблизительно 150 Гц). На осциллографе должна получиться фигура Лиссажу с кратностью  $K_1 = 1$ .
4. По шкале генератора снять показание частоты. Рассчитать значение частоты вращения электродвигателя.
5. Получить фигуры с  $K_2 = 2:1$ ,  $K_3 = 1:2$  и любым другим  $K_4$  и определить значение частоты вращения электродвигателя. Показания частоты снимать по шкале генератора.
6. Повторить проведенные ранее измерения, но показания частоты снимать по шкале частотомера. Рассчитать значения частот вращения электродвигателя, полученных по шкале частотомера.
7. Сравнить значения частоты вращения двигателя, полученные при отсчете по шкале генератора, со значениями частоты вращения двигателя, полученными при отсчете по шкале частотомера. Сделать заключение о зависимости точности измерения частоты вращения двигателя от измерения по шкале генератора и шкале частотомера.
8. Сделать заключение о зависимости точности измерения частоты вращения двигателя от кратности частот двигателя и генератора.

### **Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.

3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица с полученными измерениями.
5. Выводы по проделанной работе.

### **Рекомендуемая литература**

Фемке, Л. И. Электрические измерения / Л. И. Фемке. – Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. – С. 221–237, 240–243.

### **Лабораторная работа № 18**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОКОМПЕНСАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **Цель работы**

1. Изучить назначение и принцип работы фотокомпенсационного усилителя постоянного (ФКУ) тока.
2. Определить коэффициент преобразования ФКУ и ознакомиться с классификацией амортизаторов.

### **Инструменты и принадлежности**

1. Фотокомпенсационный усилитель.
2. Магазин сопротивлений.
3. Милливольтметр.
4. Вольтметр.
5. Печь с термопарой.

### **Общие сведения**

*Компенсаторами* (или потенциометрами) называются приборы для измерения методом сравнения ЭДС, напряжений или величин, с ними связанных. Существуют компенсаторы как постоянного, так и переменного тока.

## Компенсаторы постоянного тока

Принцип действия компенсаторов заключается в том, что ЭДС  $E_x$  уравнивается соответствующим падением напряжения

$$U_k = I_k R,$$

возникающим на компенсационном сопротивлении  $R_k$  при прохождении по нему тока  $I_1$  от внешнего источника ГВ.

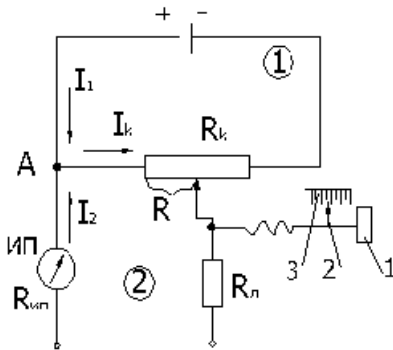


Рис. 18.1. Схема компенсатора  
Из (18.1) и (18.2) получаем

Для узла А

$$I_k = I_1 + I_2. \quad (18.1)$$

Для контура 2

$$E_x = I_2 R_{ин} + I_2 2R_{л} + I_k R, \quad (18.2)$$

где  $R_{ин}$  – внутреннее сопротивление измерительного прибора;  
 $R_{л}$  – сопротивление линий связи.

$$I_2 = (E_x - I_1 R_k) / (R_{ин} + 2R_{л} + R).$$

Значение тока  $I_2$  будет равно 0, если

$$E_x = I_1 R_k.$$

Для измерения  $E_x$  ручкой 1 перемещают указатель 2 и ползунок  $R_k$  до получения нуля на нуль-индикаторе ИП. Рассмотренная схема является упрощенной и обладает значительными недостатками, поэтому применяется крайне редко.

### Компенсационные схемы включения

Компенсаторы постоянного тока обычно выполняют по следующей схеме (рис. 18.2). Источник постоянного тока ГВ<sub>1</sub> обеспечивает

протекание рабочего тока  $I$  в цепи, составленной из измерительного  $R_n$ , установочного  $R_y$  и регулировочного  $R_p$  резистора. Образцовым источником напряжения служит нормальный элемент GB2. При помощи переключателя  $S$  гальванометр  $G$  можно подключать или в цепь нормального элемента (положение «НЭ»), или в цепь измеряемого напряжения (положение «X»). В соответствии с идеей метода измеряемое напряжение  $U_x$  необходимо сравнить с падением напряжения, создаваемым рабочим током  $I$  на участке  $R$  измерительного резистора  $R_n$ . На практике в качестве  $R_n$  используют магазин резисторов, обеспечивающих высокую точность задания требуемого значения  $R$ .

Процесс измерения напряжения состоит из двух операций:

- 1) установки рабочего тока  $I$ ;
- 2) уравнивания измеряемого напряжения  $U_x$  напряжением, создаваемым рабочим током на  $R$ .

Для установки рабочего тока переключатель гальванометра ставят в положение «НЭ» и при помощи резистора  $R_p$  добиваются отсутствия тока в гальванометре. Это произойдет в том случае, если падение напряжения на установочном резисторе  $R_y$  будет равно ЭДС нормального элемента:

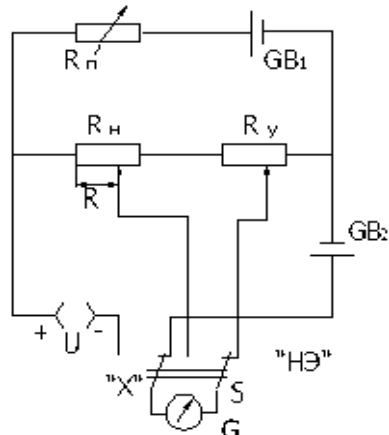


Рис. 18.2. Компенсатор постоянного тока

$$IR_y = E_n.$$

Рабочий ток при этом будет

$$I = E_n / R_y. \tag{18.3}$$

Затем переключатель  $S$  устанавливают в положение «X» и при помощи  $R_n$  устанавливают такое значение сопротивления  $R$ , при котором происходит уравнивание измеряемого напряжения падением напряжения  $IR$ . Это произойдет тогда, когда ток через гальванометр будет отсутствовать. В результате уравнивания

$$U_x = IR. \tag{18.4}$$

После подстановки (18.3) в (18.4) получим

$$U_x = E_n / R_v R. \quad (18.5)$$

Для удобства работы с прибором  $R_v$  выбирают так, чтобы отношение  $E_n / R_v$  было числом, представимым в виде  $10^{-n}$ , где  $n$  – целое число. Если, например,  $n = 4$ , то  $E_n / R_v = 10^{-4}$  и соотношение (18.5) принимает вид  $U_x = 0,0001R$ .

Практически этап вычислений исключается полностью, так как на шкалах магазина резисторов  $R_n$  наносятся числовые отметки, сразу дающие напряжение  $U_x$  в вольтах.

**Достоинство приборов:**

- возможность измерения малых ЭДС и  $U$ ;
- высокая точность измерений;
- отсутствие потребления энергии из цепи ПП.

**Недостатки:**

- сравнительно большие габариты и масса;
- неоперативность в работе (настройка, переключение требуют много времени);
- не обеспечивается непрерывное слежение за изменением входной величины;
- неудобство в автоматизации.

Поэтому при менее точных измерениях и необходимости автоматизации используют другие схемы.

*Автоматический компенсатор постоянного тока*

Измеряемое напряжение  $U$  компенсируется напряжением  $U_{об}$ , возникающим между точкой  $a$  и подвижным контактом  $b$  резистора  $R_p$  (рис. 18.3).

Если компенсации нет, то компенсированная разность  $U - U_{об}$  усиливается и воздействует на реверсивный двигатель РД. Механическая связь двигателя с подвижным контактом  $b$  обеспечивает компенсацию  $U$  напряжением  $U_{об}$ . Двигатель при своем вращении перемещает указатель вдоль шкалы компенсатора, обеспечивая возможность считывания показаний. Кроме того, большинство автоматических компенсаторов имеют механизмы записи показаний. Требуемое значение рабочего тока устанавливается при помощи резистора  $R_v$ , включенного последовательно со стабилизированным источником питания.



При правильной установке падение напряжения на  $R_4$  должно быть равно ЭДС «НЭ».

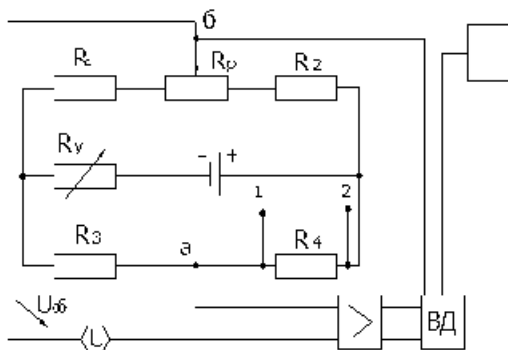


Рис. 18.3. Автоматический компенсатор постоянного тока

### Фотогальванический компенсатор

При подаче  $E_x$  ток протекает по рамке гальванометра (рис. 18.4) и поворачивает ее.

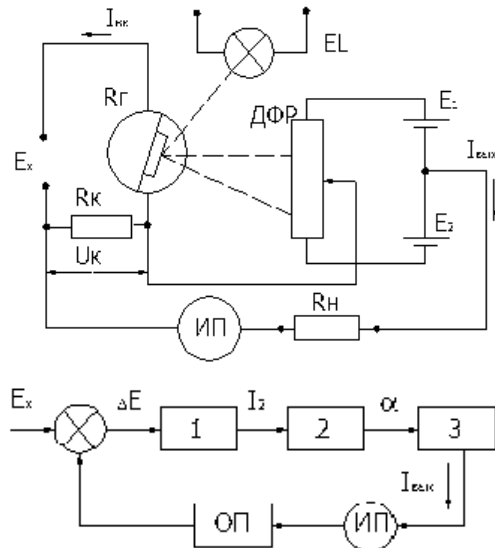


Рис. 18.4. Электрическая и блок-схема фотогальванического компенсатора

Луч света от осветителя  $E_L$ , отразившись от зеркала гальванометра, вызывает перераспределение освещенности дифференциального фоторезистора (ДФР), и в выходной цепи прибора появится ток  $I_{\text{вых}}$ . Падение напряжения  $U_K$  на компенсационном резисторе  $R_K$  ( $U_K = R_K I_{\text{вых}}$ ) стремится скомпенсировать входное напряжение  $E_x$ . Полной компенсации в схеме не произойдет, так как для поддержания рамки в отклоненном состоянии в ее цепи должен протекать некоторый ток некомпенсации  $I_{\text{нк}}$ . При достаточно высокой чувствительности гальванометра можно считать, что  $I_{\text{нк}} \approx 0$ . Тогда

$$E_x \approx I_{\text{вых}} R_K,$$

т. е. выходной ток может служить мерой  $E_x$ . В качестве ИП используются магнитоэлектрические милли- и микроамперметры.

### *Компенсаторы переменного тока*

Переменное напряжение характеризуется заданием его амплитуды и фазы. Поэтому для компенсации одного синусоидального напряжения другим необходимо, чтобы их частоты и амплитуды были равны, а фазы различались на  $180^\circ$  (рис. 18.5).

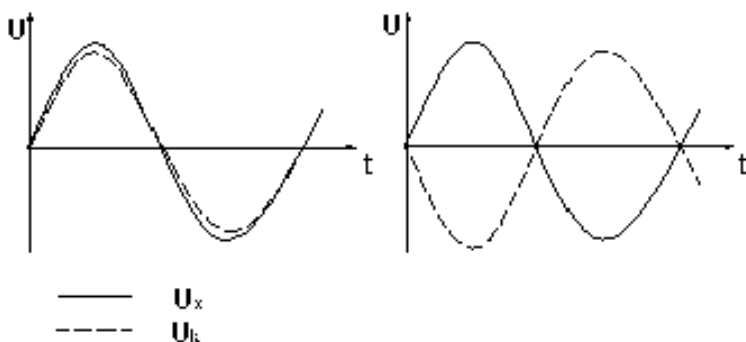


Рис. 18.5. Компенсация синусоидального напряжения

Условия компенсации можно сформулировать по-другому: активная и реактивная части одного напряжения должны компенсировать активную и реактивную части другого напряжения:

$$U_{ax} = -U_{ak}; \quad U_{rx} = -U_{rk}.$$

Вследствие этого компенсаторы (потенциометры) переменного тока должны иметь схему более сложную, чем компенсаторы постоянного тока.

Различают два вида потенциометров переменного тока:

1) прямоугольно-координатные, в которых компенсирующее напряжение  $U_k$  получается как сумма двух взаимно перпендикулярных напряжений, каждое из которых регулируется по величине. Это позволяет регулировать суммарное напряжение  $U_k$  как по величине, так и по фазе;

2) полярно-координатные, в которых отдельно регулируется модель компенсирующего напряжения и отдельно – его фаза (обычно с помощью фазорегулятора того или иного вида).

Полярно-координатные потенциометры вследствие сложности реализации фазовращателя применяются редко.

### *Прямоугольно-координатный компенсатор*

Цепь (рис. 18.6) имеет два контура. Первый – контур тока  $I_1$  – содержит измерительный резистор  $R_{AB}$ , первичную обмотку катушки взаимноиндуктивности  $M$  и амперметр  $A$ . Второй контур состоит из вторичной обмотки катушки  $M$ , измерительного резистора  $R_{A'B'}$  и балластного резистора  $r_f$ . Контур обтекается током  $I_2$ . Сопротивления  $r_f$  выбираются столь большими, что ток  $I_2$  можно практически считать совпадающим по фазе с ЭДС вторичной обмотки катушки  $M$ , наводимой током  $I_1$ . Поэтому сдвиг фаз между токами  $I_1$  и  $I_2$  равен  $\pi/2$  ( $90^\circ$ ).

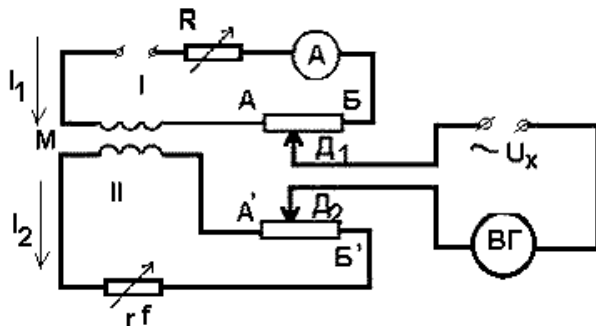


Рис. 18.6. Прямоугольно-координатный компенсатор

Напряжение  $U_x$  снимается с регулируемой части  $D_1$  и  $D_2$ . Можно менять напряжения по величине и фазе. Напряжение остается в пределах первого квадранта, т. е. изменение фазы ограничено углами  $0-\pi/2$  ( $0-90^\circ$ ).

### Назначение и принцип работы фотокомпенсационного усилителя

Электрический сигнал, поступающий от первичного измерительного преобразователя (термопары), может иметь амплитуду в десятые доли милливольт. В этом случае измерение таких сигналов связано с использованием высокочувствительных приборов, которые должны потреблять малую энергию из измерительной цепи (цепи термопары). Задача существенно упрощается, если на усилитель подать сигнал от ПИП и после этого измерить его менее чувствительным прибором. В качестве такого усилителя можно использовать ФКУ постоянного тока.

Вместе с присоединенными к их выходу приборами показывающие или регистрирующие приборы позволяют измерять малые токи (от 5 мА) и напряжения (от 0,2 мВ). При этом мощность, потребляемая от измерительной цепи, составляет ничтожно малую величину порядка  $5 \cdot 10^{-15}$  Вт при максимальном значении измеряемой величины. По сравнению с зеркальными гальванометрами время успокоения указателя прибора значительно меньше.

В схеме к настоящей работе установлен ФКУ Ф115, выход которого присоединен к сопротивлению, на котором падение напряжения измеряется с помощью вольтметра. На вход Ф115 подается термоЭДС, развиваемая термопарой.

Усилитель Ф115 применяется как усилитель тока или напряжения. Пределы измерения по напряжению могут быть 0,2–75 мВ при входном сопротивлении  $1 \cdot 10^6$  Ом.

Усилитель можно характеризовать коэффициентом преобразования

$$K = I/U_{\text{вх}}, \text{ мА/мВ,}$$

где  $I$  – выходной ток;

$U_{\text{вх}}$  – входное напряжение (в данном случае ЭДС, развиваемая термопарой).

Коэффициент преобразования должен оставаться постоянным для всего предела измерения, что непосредственно влияет на точность измерения. Для усилителя Ф115 основная погрешность коэффициента преобразования для пределов измерения 0,2–75 В не превышает 0,1 %.

Значение  $K$  при эксплуатации или после ремонта может измениться, что требует проверки его величины. Пример такой проверки рассматривается в настоящей работе.

Принцип действия ФКУ заключается в следующем. Световой поток от осветительной лампы Л (рис. 18.7) падает на зеркало гальванометра и, отражаясь, попадает на дифференциально включенный фоторезистор ФС. Если половины резистора освещены неодинаково, то через внешний прибор, присоединенный к зажимам «Выход», потечет ток  $I$ . Направление тока будет зависеть от того, какая из половин резистора освещена больше. В исходном состоянии гальванометр посредством корректора устанавливается в такое положение, чтобы ток в цепи внешнего прибора был равен нулю. Измеряемое напряжение, которое подается к зажимам «Вход», сравнивается с падением напряжения на компенсационном резисторе  $R_k$ . Если эти напряжения не равны, то по рамке гальванометра потечет ток и подвижная часть гальванометра с зеркалом придет в движение. При этом изменяются распределение света между половинами фоторезистора и, следовательно, распределение напряжения между ними. Последнее вызывает изменение тока, протекающего через компенсационный резистор  $R_k$ . Движение рамки прекращается, когда падение напряжения на компенсационном резисторе уравнивает измеряемое напряжение.

В результате компенсационный ток устанавливается пропорциональным измеряемому напряжению. Благодаря компенсационной схеме результат изменения не зависит от непостоянства параметров фоторезистора и напряжения цепи питания. Изменение этих величин автоматически компенсируется соответствующим поворотом подвижной части гальванометра.

Кнопка  $K_1$  сопротивления  $R_y$  служит для установки гальванометра в нулевое положение.

На выходе может быть установлен высокочувствительный прибор, для которого ток полного отклонения указателя составляет десятые доли микроампера, однако при этом возрастает чувствительность усилителя к изменению параметров резисторов, напряжения питания.

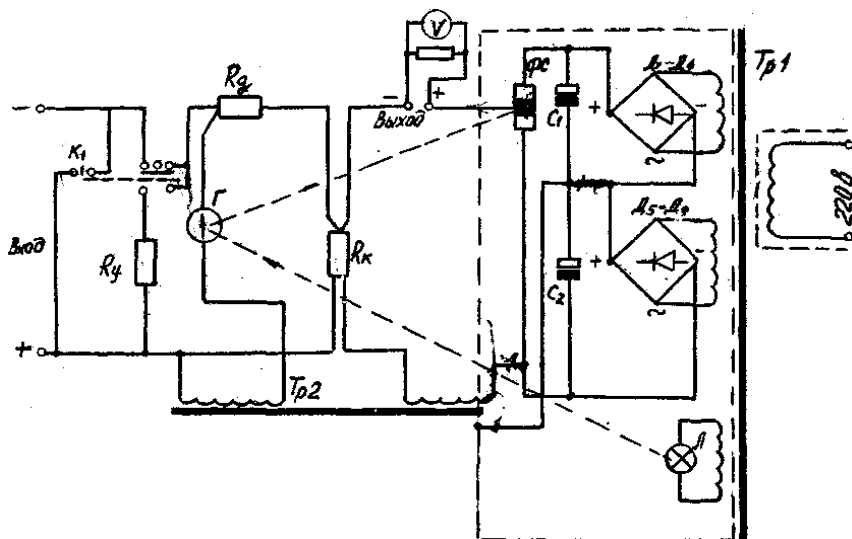


Рис. 18.7. Принципиальная схема ФКУ постоянного тока:

Г – гальванометр; Л – осветительная лампа; ФС – фоторезистор ФС-К7; R<sub>к</sub> – компенсационный резистор; R<sub>д</sub> – добавочный резистор; R<sub>в</sub> – резистор для установки нуля; K<sub>1</sub> – кнопка контроля нуля; T<sub>p1</sub> и T<sub>p2</sub> – трансформатор питания и корректирующий

При измерении малых напряжений источник измеряемого напряжения следует соединять с усилителем нелужеными медными проводами для исключения возможности появления термоЭДС.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 18.8.

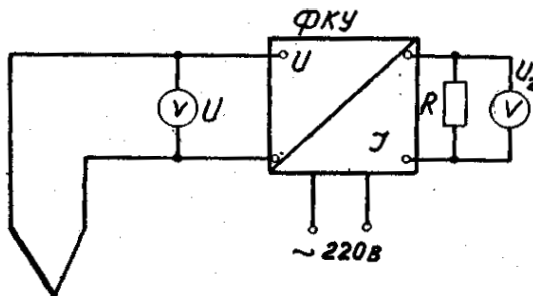


Рис. 18.8. Принципиальная схема экспериментальной установки

На выходе ФКУ подключается резистор  $R = 3000 \text{ Ом}$ , падение напряжения на котором измеряется вольтметром  $U_2$ . По показанию  $U_2$  можно определить  $I$ . Величина  $U_{\text{вх}}$  определяется высококучувствительным вольтметром  $U_1$ .

### Порядок выполнения работы

1. Получить допуск к работе.
2. Включить ФКУ и вольтметр  $U_2$  в сеть 220 В. Включить печь.
3. По мере нагревания термопары от 30 до 70 °С снять показания приборов  $U_1$  и  $U_2$  через каждые 3 °С.
4. По мере охлаждения термопары от 70 до 30 °С снять показания приборов  $U_1$  и  $U_2$  через каждые 3 °С.
5. Подсчитать среднее значение коэффициентов преобразования.

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица с полученными результатами.
5. Графики  $U_{\text{нагр}} = f(T)$ ,  $U_{\text{ост}} = f(T)$ .
6. Выводы по проделанной работе.

### Рекомендуемая литература

Фремке, А. Ф. Электрические измерения / Л. И. Фемке. – Москва: Госэнергоиздат, 1963. – С. 258–259.

## Лабораторная работа № 19

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, МОДУЛИРОВАННЫЕ ПО АМПЛИТУДЕ

#### Цель работы

1. Изучить способы включения индуктивных преобразователей в мостовую схему.
2. Исследовать возможность применения индуктивного моста в качестве частотного модулятора.
3. Исследовать и измерить сигналы в различных узлах мостовой схемы.
4. Ознакомиться со структурной схемой, конструкцией и принципом действия работы расходомера РТСВ.

#### Инструменты и принадлежности

1. Лабораторный стенд.
2. Вольтметр.

#### Общие сведения

**Измерительной информацией** называется сообщение о значениях измеряемых величин. Они выражаются и передаются от одних устройств к другим в виде сигналов, образованных путем модуляции какого-либо носителя. Устройство, изменяющее параметры одного сигнала под воздействием параметров другого сигнала, называется **модулятором**.

Сигнал, параметры которого изменяются, называется *несущим*.

Сигнал, управляющий параметрами несущего, называется – *модулирующим*.

Носителями измерительной информации могут служить:

- постоянный ток;
- переменный синусоидальный ток;
- импульсный ток.



### ***Постоянный ток***

Постоянный ток имеет только один параметр, в качестве которого используются ток или напряжение. Поэтому модуляция постоянного тока состоит в изменении тока (или напряжения).

Модулированный сигнал постоянного тока

$$U_x(t) = U_0 + kx(t),$$

где  $U_0$  – значение несущего напряжения до модуляции;

$k$  – коэффициент усиления усилителя.

### ***Переменный синусоидальный ток (напряжение)***

Переменное синусоидальное напряжение характеризуется тремя параметрами:  $U_0$  – амплитудой;  $\omega_0$  – круговой частотой;  $\varphi_0$  – начальной фазой:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Индекс «0» – параметры до модуляции (т. е. несущие).

Модуляции могут подвергаться как один параметр, так два и три параметра одновременно.

### ***Амплитудная модуляция***

При амплитудной модуляции (рис. 19.1) сигнал описывается выражением

$$U(t) = (U_0 + kx(t)) \sin(\omega_0 t + \varphi_0).$$

Коэффициент  $k$  выбирается таким образом, чтобы при всех возможных отрицательных значениях  $x$  соблюдалось условие  $U \geq 0$ . Следует отметить, что модулирующий сигнал  $x(t)$  в отличие от носителя  $U_0(t)$  не является синусоидальным.

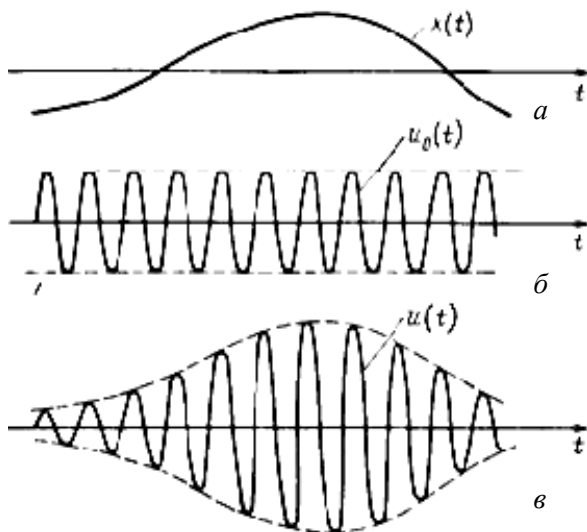


Рис. 19.1. Амплитудная модуляция:  
 $a - x(t)$  – функция (модулирующий сигнал);  $b - U_0(t)$  – несущий сигнал;  
 $U(t)$  – модулированный сигнал. Огибающая (пунктир)  
 повторяет по форме функцию  $x(t)$

Глубина модуляции  $U_{\min}/U_{\max} = 100 \%$ .

Амплитудный модулятор (рис. 19.2,  $a$ ) представляет собой усилитель  $У$  с управляющим коэффициентом усиления  $k_y$ . На один его вход подаются несущие колебания  $U_0(t)$  от несинусоидального генератора, а на другой вход – управляющий коэффициент усиления, т. е. величина, линейно связанная с информационным сигналом  $x(t)$ .

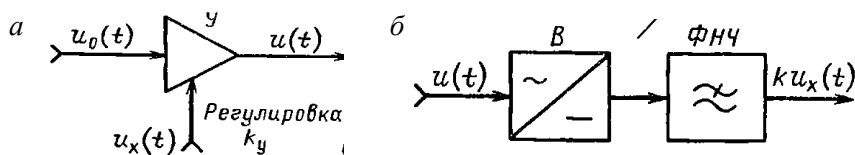


Рис. 19.2. Амплитудный модулятор ( $a$ ) и демодулятор ( $b$ )

Восстановить модулированный сигнал можно с помощью амплитудного демодулятора (рис. 19.2,  $a$ ). Амплитудный демодулятор (АД) представляет собой сочетание выпрямителя ( $B$ ) с фильтром

низких частот (ФНЧ), который сглаживает колебания частоты  $\omega_0$ , но пропускает более медленные колебания. Сигнал на выходе пропорционален  $x(t)$ .

Достоинства:

– для переноса сигнала требуется сравнительно узкий спектр частот;

– простота модуляции и демодуляции;

– простота усиления.

Недостаток – уменьшение амплитуды сигнала при большом сопротивлении канала связи, что приводит к погрешности и необходимости калибровки.

### Частотная модуляция

От указанного недостатка свободна частотная модуляция (рис. 19.3).

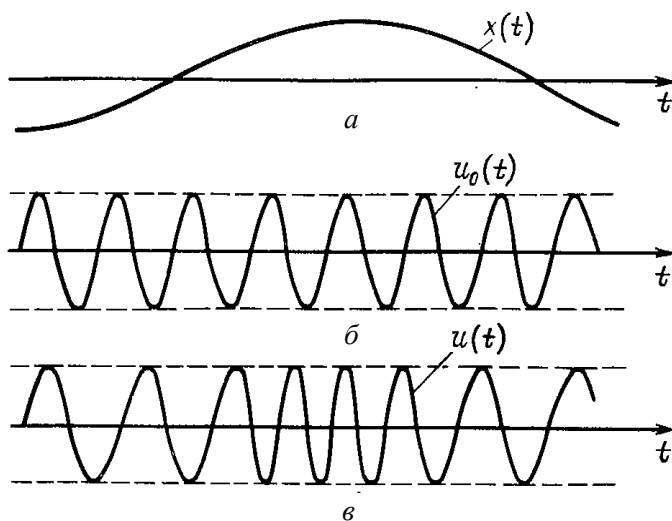


Рис. 19.3. Частотная модуляция

Сущность метода заключается в изменении несущей частоты по закону  $x(t)$ :

$$U(t) = (U_0 \sin(\omega_0 t + k \int x(t) dt + \varphi_0)).$$

Практически процесс частотной модуляции (рис. 19.4, а) состоит в том, что  $U_x(t)$  воздействует на частотный задающий элемент (ЧЭ), определяющий частоту генератора ( $\Gamma$ ).

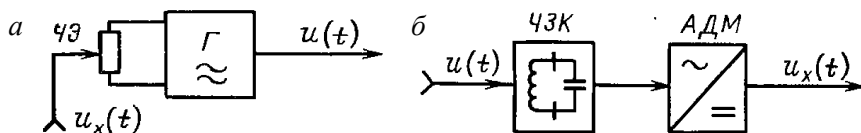


Рис. 19.4. Частотный модулятор (а) и демодулятор (б)

Демодуляция осуществляется разными методами.

Используется частотно-зависимый контур ЧЗК (рис. 19.4, б), амплитуда колебаний на выходе которого зависит не только от амплитуды входного напряжения, но и от его частоты. Он преобразует колебание, модулированное по частоте, в колебание, модулированное по амплитуде. За ним включается амплитудный демодулятор АДМ. Затем преобразование идет, как и при АДМ. В результате на выходе получается сигнал  $U_x(t)$ .

### Фазовая модуляция

Фазовая модуляция заключается в изменении начальной фазы колебаний, при этом модулированный сигнал описывается выражением

$$U(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \Delta\phi k x(t) + \phi_0).$$

Процесс фазовой модуляции состоит в воздействии входного сигнала на элемент задающего генератора, который определяет значение начальной фазы.

Демодуляция заключается в определении начальной фазы модулирующего сигнала путем ее сравнения со значением начальной фазы несущего сигнала. Разность сигналов равна  $\Delta\phi k x(t)$ . Таким образом, для передачи опорного сигнала нужен дополнительный канал.

Достоинство, характерное для фазовой и частотной модуляции, – высокая помехозащищенность.

Недостатки:

- сложность реализации модуляторов и демодуляторов;
- большая ширина канала, т. е. на одной линии получаем меньшее число каналов по сравнению с амплитудной модуляцией.

### Импульсный ток (напряжение)

Импульсный ток (рис. 19.5) так же используется в качестве носителя информации, как и синусоидальный. Для этого берут периодическую последовательность импульсов прямоугольной формы, которые характеризуются следующими параметрами:  $U_0(t)$  – амплитудой,  $T_0$  – периодом,  $t_{и0}$  – временем импульса,  $\mu_0 = T_0 / t_{и0}$  – скважностью. Модуляции может подвергаться любой из этих параметров.

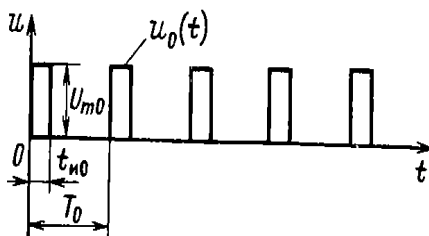


Рис. 19.5. Импульсный ток  
 $\mu_0 = T_0 / t_{и0}$  – скважностью. Модуляции может подвергаться любой из этих параметров.

### Амплитудно-импульсная модуляция

Амплитудно-импульсная модуляция (рис. 19.6) состоит в изменении амплитуды импульсов по закону измеряемой величины  $x(t)$ .

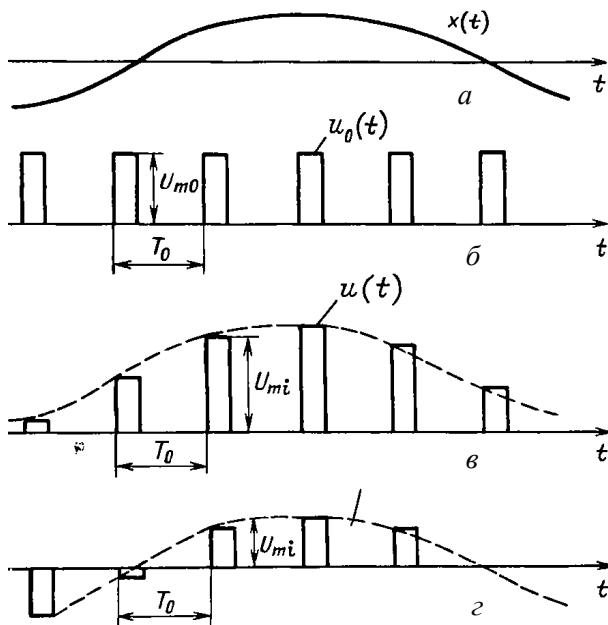


Рис. 19.6. Амплитудно-импульсная модуляция

Значения  $x$  берутся в моменты начала импульса, т. е. имеет место дискретизация функции  $x(t)$  по времени.

Огибающая амплитуд импульсов повторяет по форме кривую  $x(t)$ . Возможен вариант с изменением полярности импульсов в зависимости от знака.

Модуляция осуществляется так же, как и амплитудная модуляция синусоидального колебания. На основной вход идет импульсный сигнал, а на вход, управляющий коэффициентом усиления усилителя, – модулирующий.

Демодуляция состоит в том, что каждый очередной импульс амплитудой  $U_{mi}$  подается через ключ К на элемент памяти (рис. 19.7).

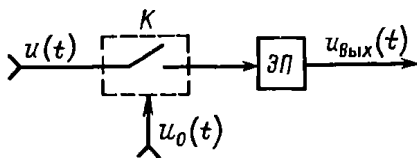


Рис. 19.7. Амплитудно-импульсный демодулятор

Пример элемента памяти – емкость усилителя постоянного тока. Элемент памяти хранит значение  $U_{mi}$  до поступления следующего импульса. Ключ К замыкается на время действия импульса. Напряжение на выходе элемента памяти  $u_{вых}(t)$  заменяет непрерывную прямую  $x(t)$  ступенчатой линией.

непрерывную прямую  $x(t)$  ступенчатой линией.

### Частотно-импульсная модуляция

Частотно-импульсная модуляция заключается в изменении частоты импульсов следования по закону  $x(t)$ . Частотно-импульсная модуляция реализуется путем воздействия на импульсный генератор по блок-схеме, показанной на рис. 19.8.

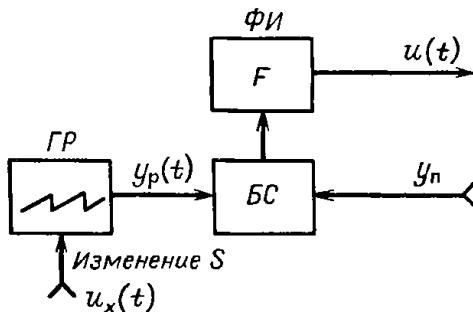


Рис. 19.8. Блок-схема частотно-импульсного модулятора

Входной сигнал  $x(t)$  (рис. 19.9), линейно связанный с измеряемой величиной  $x$ , управляет крутизной  $S$  генератора развертки  $U_p(t)$ .

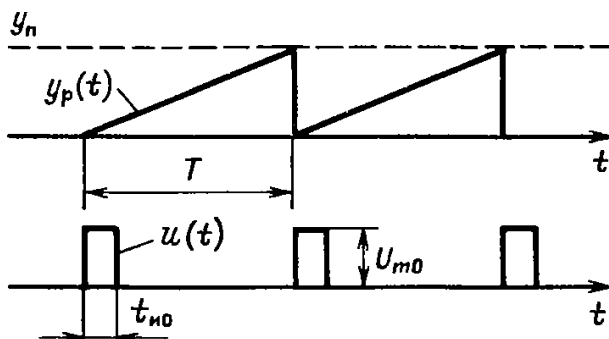


Рис. 19.9. Частотно-импульсная модуляция

Период  $T_0$  определяется временем нарастания  $u_p(t)$  до значения  $u_n$ . Момент равенства обнаруживается блоком сравнения БС, по команде которого формирователь импульсов выдает очередной импульс выходного сигнала  $u(t)$ . Формирователь импульсов формирует импульсы как с постоянной длительностью, так и с постоянной скважностью. Для формирования импульсов с постоянной скважностью применяют двухтактную систему модуляции, т. е. такты развертки разделяют триггерным счетным устройством на четные и нечетные и в течение нечетного периода развертки выдают импульс, а в течение четного – паузу. Тогда период выходного сигнала  $T' = 2T$ . Увеличив вдвое крутизну развертки вспомогательного генератора развертки, можно получить тот же диапазон частот, что и в одноконтурной схеме.

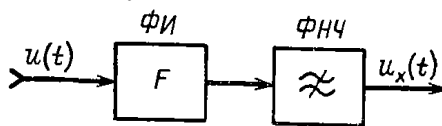


Рис. 19.10. Частотно-импульсный демодулятор

Простейший частотно-импульсный демодулятор (рис. 19.10) состоит из формирователя импульсов (ФИ) и фильтра низких частот (ФНЧ).

Формирователь импульсов формирует импульсы по амплитуде  $u_m$  и длительности  $t_n$  так, чтобы выдерживалось условие  $U_m t_n = \text{const}$ . А фильтр низких частот нужен для задержания в спектре этих импульсов высоких частот и пропускания низких, соответствующих

спектру функции, т. е. ФНЧ выделяет текущее среднее значение импульсного сигнала.

### Широтно-импульсная модуляция

Широтно-импульсная модуляция (рис. 19.11) получается путем изменения импульсов  $t_{ni}$  по линейной зависимости от дискретных ординат  $x_i$ , при этом период  $T_0$  и амплитуда  $U_m$  сохраняются постоянными.

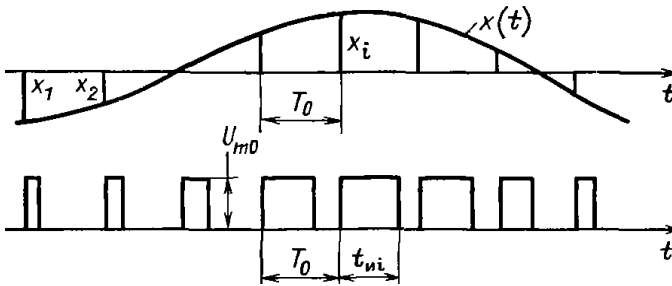


Рис. 19.11. Широтно-импульсная модуляция

Для реализации широтно-импульсной модуляции используется метод развертывающего преобразования (рис. 19.12).

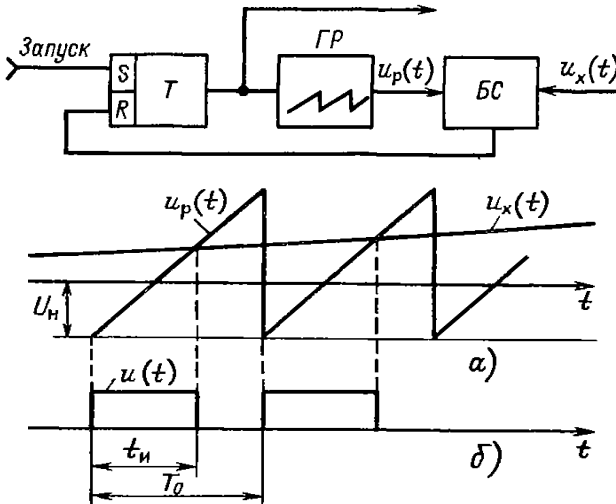


Рис. 19.12. Широтно-импульсный модулятор



Генератор развертки ГР работает с периодом  $T_0$  и формирует пилообразное напряжение. Начало развертки определяется импульсом запуска на входе S-триггера.

С приходом импульса на выходе триггера появляется логическая единица, на генераторе развертки начинает формироваться пилообразное напряжение. Блок сравнения БС сравнивает напряжение развертки  $u_p(t)$  с напряжением  $u_x(t)$ . В момент их равенства блок сравнения выдает на вход R триггера сигнал, переводящий триггер в состояние 0. Сформированный на выходе триггера импульс по длительности  $t_{и}$  будет линейно связан с сигналом  $u_x(t)$ .

Простейший широтно-импульсный демодулятор может быть построен по схеме частотно-импульсного демодулятора. Внутренние отличия состоят в том, что формирователь импульсов должен обеспечивать постоянство амплитуды  $U_m$  и импульса  $t_{и}$  при равной длительности на входе и на выходе.

### Фазоимпульсная модуляция

В несущей последовательности импульсов можно смещать импульсы во времени, располагая их не в начале каждого периода, а в любой его части. Смещение импульса по времени  $\tau$  соответствует смещению по фазе, т. е. фазу можно выразить в существенных единицах  $\nu = \tau/T$  или в радианах  $\varphi = 2\pi\tau/T$ , рис. 19.13.

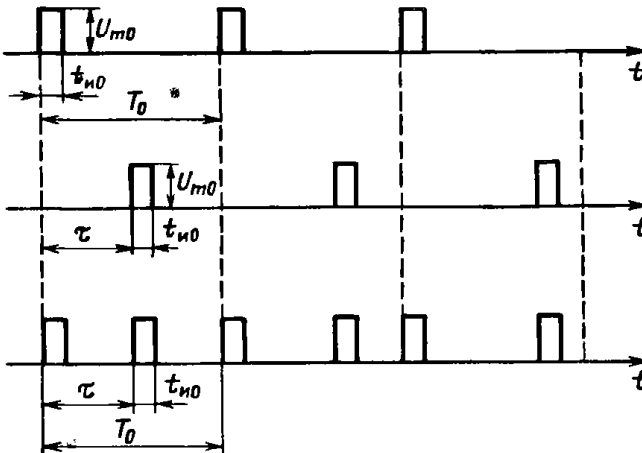


Рис. 19.13. Фазоимпульсная модуляция

Для восстановления значений выходного фазомодулированного сигнала его надо сравнить с несущей (опорной) последовательностью сигналов. Для удобства передачи информации сигнал получают суммированием несущего и модулированного. При этом необходимо соблюдать условия

$$\tau_{\text{мин}} > t_{\text{но}},$$

где  $\tau$  – фазовое смещение;

$t_{\text{но}}$  – длительность.

Суммированный сигнал получается с помощью дифференцирующего устройства, выделяющего фронты импульсов, и формирователя, выдающего импульсы длительностью  $t_{\text{но}}$ . При этом значения  $t_i$  в образующем сигнале равны значениям  $t_i$  исходного. Демодулировать фазоимпульсный модулированный сигнал можно, преобразовав его в широтно-импульсный сигнал с помощью триггера, который переводится в состояние 1 фронтом первого (опорного) импульса и возвращается в состояние 0 фронтом второго (отсчетного) импульса.

Достоинства импульсной модуляции:

- высокая помехоустойчивость;
- возможность использования элементов импульсной техники для построения модуляторов и демодуляторов;
- удобство преобразования сигналов в цифровую форму.

Недостатки:

- сложность реализации модуляторов и демодуляторов;
- более широкий спектр, из чего следует, что необходима большая ширина канала связи, т. е. на одной линии получается меньшее число каналов по сравнению с амплитудной модуляцией.

### *Кодово-импульсная модуляция*

Все виды импульсной модуляции основаны на изменении одного из параметров несущей последовательности импульсов. Возможно получение сигналов комбинированием импульсов. Процесс образования такого сигнала называется *кодово-импульсной модуляцией* (рис. 19.14). Она выполняется следующим образом.

Непрерывная функция  $x(t)$  подвергается дискретизации по времени с периодом  $\Delta t$  таким, чтобы на основании наборов дискретных ординат  $x_i$  можно было бы с достаточной точностью восстановить исходную функцию  $x(t)$ . Дискретизация – процесс получения отсчетов измеряемой величины в определенные дискретные моменты времени. Затем каждое из полученных значений  $x$  подвергается квантованию  $\Delta x$ , в ходе которого непрерывные значения величины заменяются значениями уровней квантования, т. е. вместо непрерывных значений величине приписываются значения ближайших уровней. Каждый уровень квантования представляется последовательностью сигналов, т. е. кодом. Чаще всего применяются коды из элементов, имеющих только два значения (0 и 1). Тогда при преобразовании сигнала каждый элемент кода выражают импульсом, т. е. символ 1 выражается импульсом, а 0 – отсутствием импульса. При выборе в качестве измерительного параметра амплитуды символы 1 и 0 иногда выражают равными по модулю, но противоположными по полярности.

Демодуляция кодово-импульсного сигнала осуществляется с помощью специальных декодирующих устройств.

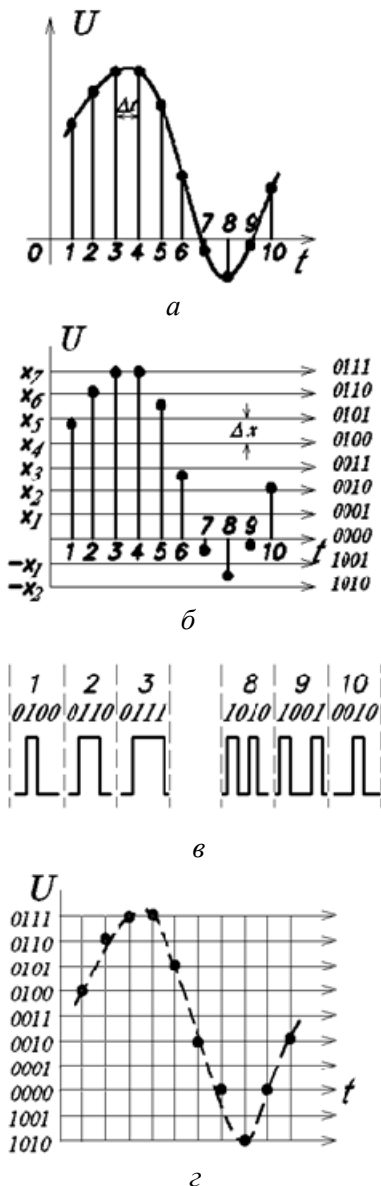


Рис. 19.14. Кодово-импульсная модуляция

Кодовый сигнал подается на вход приемника селектора синхроимпульсов, который из входа сигнала выделяет синхроимпульсы на вход коммутатора. Коммутатор поочередно подключает выходы приемника к входам элементов памяти (ЭП) таким образом, чтобы первый импульс кодовой индикации запоминал элемент памяти ЭП1. Второй импульс – ЭП2 и т. д. Дешифратор считывает информацию с элементов памяти и выдает сигнал на устройство отображения информации. Селектор устанавливается в исходное состояние, а дешифратор отключается от элементов памяти.

Достоинства кодово-импульсной модуляции:

- высокая помехоустойчивость.
- для получения хранения и преобразования можно использовать элементы цифровой техники;
- возможность интегрального исполнения.

Недостатки:

- потеря информации при дискретизации;
- погрешность при квантовании (при большом шаге квантования).

### **Перечень приборов, входящих в лабораторный стенд**

В состав лабораторного стенда (рис. 19.15) входят:

- прибор показывающий РТСВ 10-8:
  - блок питания и усиления БПУ 2-1,
  - измерительный блок;
- измерительный узел расходомера:
  - датчик расхода РТС 10,
  - датчик плотномера ДПЕ 3-1;
- усилитель импульсный с питанием УИП4-1;
- генератор ПАГ 1-Ф.

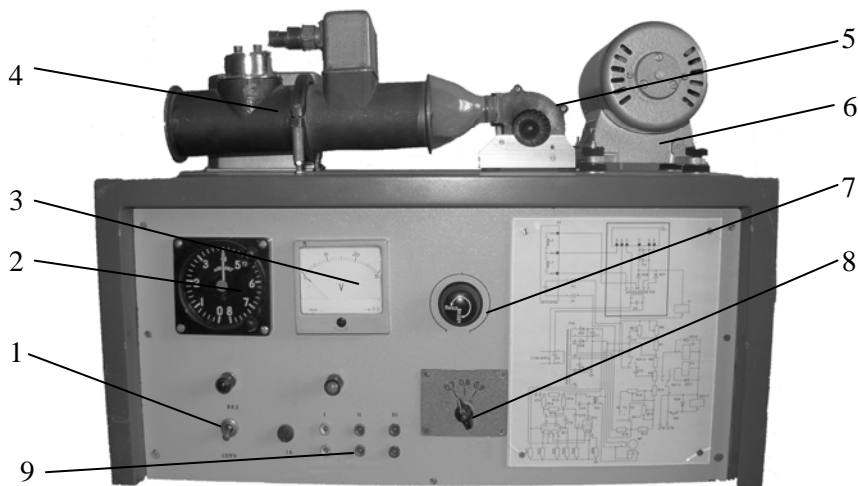


Рис. 19.15. Общий вид лабораторного стенда:

- 1 – тумблер питания; 2 – показывающий прибор; 3 – вольтметр;  
 4 – измерительный узел расходомера; 5 – крыльчатка; 6 – генератор ПАГ 1-Ф;  
 7 – регулятор частоты вращения крыльчатки; 8 – переключатель плотности;  
 9 – разъемы для снятия осциллограмм

## Описание конструкции

### *Показывающий прибор РТСВ 10-8*

Показывающий прибор РТСВ 10-8 выполнен в виде двух блоков:

1) измерительного блока для измерения суммарного расхода в весовых единицах;

2) блока питания и усиления БПУ 2-1 для питания схемы расходомера и усиления напряжения разбаланса, возникающего при изменении емкости датчика плотномера  $C_d$ .

Измерительный блок показывающего прибора расходомера является счетчиком электрических импульсов. Шкала показывающего прибора отградуирована в килограммах. Максимальному запасу вещества 8000 кг соответствует 6500 импульсов при значении плотности, равном среднему расчетному значению,  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Механизм измерительного блока состоит из электромагнитного реле, измерительного дифференциального моста, коммутационных элементов, электромагнитной муфты МЭД II, электродвигателя ДИД-05У, редуктора, устройства для перевода стрелки и блока питания и усиления БПУ 2-1.

Якорь электромагнитного реле 5 (рис. 19.16) при помощи ведущей собачки 36 поворачивает храповое колесо 37 на один зуб при каждом импульсе тока, посылаемом усилителем.

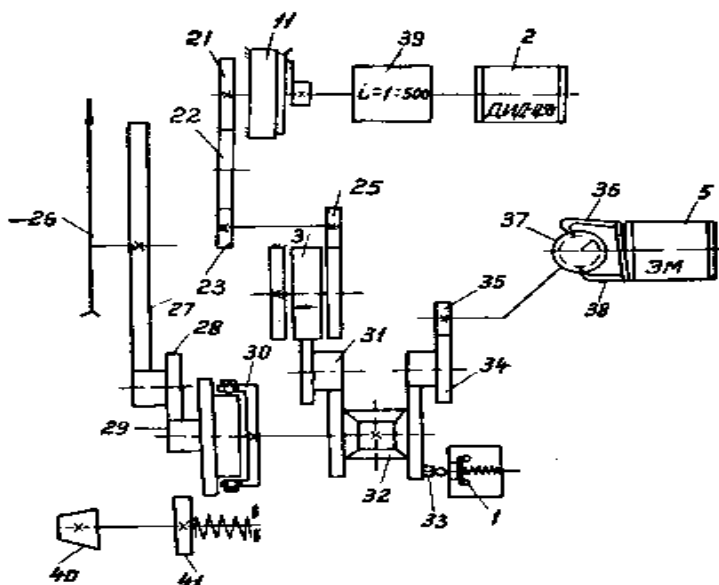


Рис. 19.16. Кинематическая схема показывающего прибора:

- 1 – переключатель малогабаритный; 2 – двигатель; 3 – магнитная муфта; 5 – электромагнит; 11 – потенциометр отработки; 21–23, 25, 27–29, 31, 34–35, 41 – шестерни; 26 – стрелка; 30 – шариковая муфта; 32 – дифференциал; 33 – кулачок; 36 – ведущая собачка; 37 – храповое колесо; 38 – стопорная собачка; 39 – редуктор; 40 – кремальера

Стопорная собачка 38 предохраняет храповое колесо от проворачивания.

Измерительный дифференциальный мост (рис. 19.17) переменного тока является частью измерительной схемы плотномера и состоит:

– из двух активных плеч, одно из которых состоит из потенциометра отработки R10, движок которого связан с осью двигателя ДИД-05У, реостата R1 и резистора R2, а другое – из резисторов R3, R4, R6 и реостатов R5, R7, R8;

– двух реактивных плеч, состоящих из емкости  $C_d$ , датчика, плотномера и емкости плеча сравнения  $C_1$ , представляющих собой постоянные емкости.

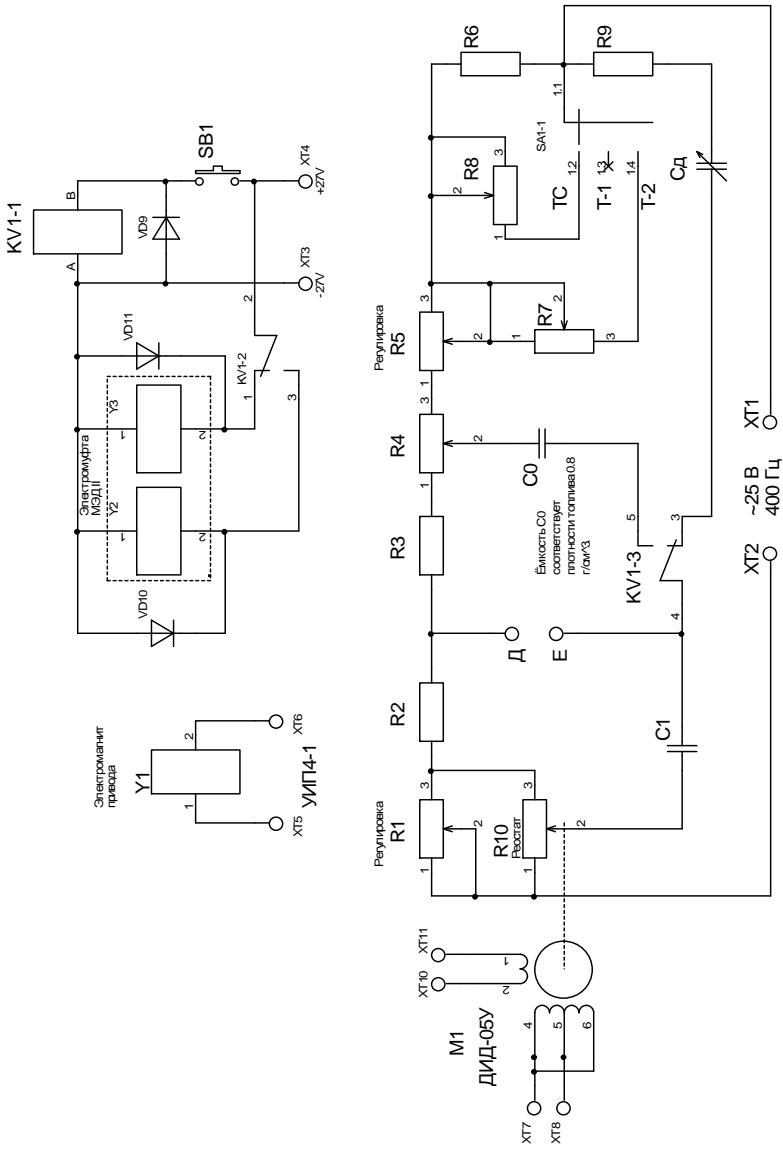


Рис. 19.17. Электрическая схема измерительного моста показывающего прибора

Реостаты R1 и R5 служат для регулировки полного угла отклонения движка потенциометра отработки R10 при изменении плотности вещества от 0,7 до 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Резисторы R7, R8 и переключатель SA1-1 предназначены для корректирования поправки при изменении марки вещества.

Резистор R9 служит для ограничения тока в диагонали моста при коротком замыкании пластин датчика плотномера.

В состав *коммутационных элементов* (см. рис. 19.17) входят микропереключатель SB1 и реле KV1-1.

Коммутационные элементы служат для периодического подключения в схему измерительного моста датчика плотномера  $C_d$  или постоянной емкости C0 и переключения обмоток Y2 и Y3 электромагнитной муфты МЭД II.

Подключение датчика плотномера  $C_d$  в схему измерительного моста происходит при размыкании контактов микропереключателя SB1, т. е. когда производится измерение плотности вещества.

*Электромагнитная муфта МЭД II* (см. рис. 19.17) предназначена для соединения при внесении поправки кинематических цепей электромагнита Y1 и двигателя ДИД-05У.

*Электродвигатель ДИД-05У* (см. рис. 19.17) представляет собой асинхронный электродвигатель переменного тока, предназначенный для работы в схеме измерителя плотности в качестве реверсивного привода движка потенциометра отработки R10, посредством которого обеспечивается состояние равновесия измерительного дифференциального моста.

*Редуктор* (см. рис. 19.16) передает вращение храпового колеса 37 электромагнита 5 через червяк, шестерни 35, 34, дифференциал 32, шариковую муфту 30, шестерни 29, 28, 27 на стрелку показывающего прибора 26.

Параллельно на эту же стрелку передается вращение ротора двигателя, вносящего поправку на плотность вещества, через редуктор 39, шестерни 21, 22, 23, 25, магнитную муфту 3, шестерни 31, дифференциал 32, шариковую муфту 30 и шестерни 29, 28, 27.

*Устройство для перевода стрелки* позволяет устанавливать стрелку на любое деление шкалы, соответствующее количеству залитого вещества. Перевод стрелки осуществляется кремальерой 40 (см. рис. 19.16).



Блок питания и усиления БПУ 2-1 (рис. 19.18) выполнен отдельным съемным блоком. На общем основании блока размещены тороидальный силовой трансформатор и ламповый усилитель.

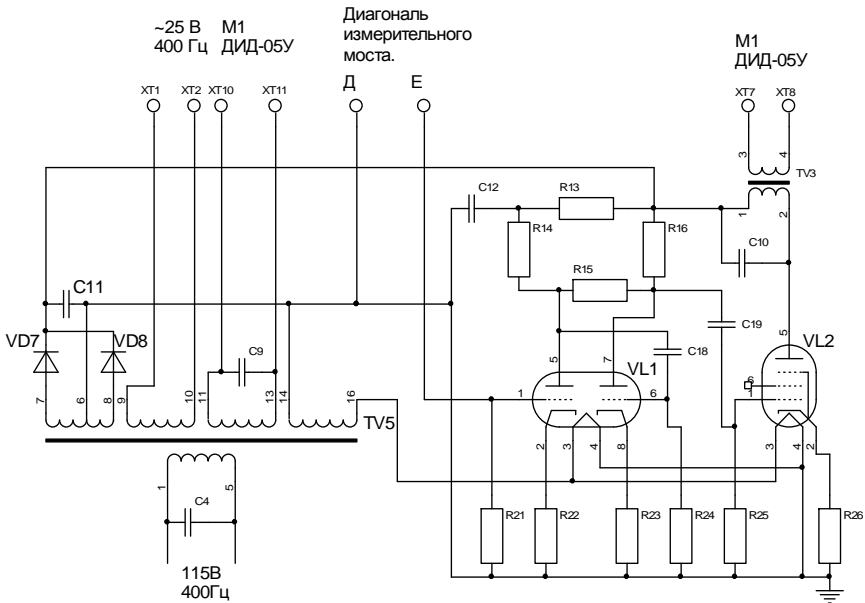


Рис. 19.18. Электрическая схема блока питания и усилителя БПУ2-1

Тороидальный силовой трансформатор TV5 имеет пять обмоток. Одна – первичная 1–5, на которую подается напряжение 115 В, 400 Гц, и четыре вторичных, из которых:

обмотка 9–10 – для питания моста (25 В);

обмотка 11–13 – для питания обмотки возбуждения ДИД-0,5У (36 В);

обмотка 14–16 – для питания цепи накала ламп VL1 и VL2 (6,3 В);

обмотка 6–7–8 ( $2 \times 110$  В) – для питания анодной цепи ламп после выпрямления по двухполупериодной схеме, составленной из двух диодов VD7, VD8 и конденсатора C11.

Ламповый усилитель (см. рис. 19.18), включенный в диагональ измерительного моста, предназначен для усиления напряжения разбаланса, возникающего при изменении емкости  $C_d$  – датчика плотномера.

### Измерительный узел расходомера

Измерительный узел расходомера включает в себя два датчика:

- датчик расхода вещества РТС 10 для измерения суммарного расхода вещества в объемных единицах (литрах), чувствительным элементом которого является вращающаяся винтовая крыльчатка;
- датчик плотнoмера ДПЕ 3-1 для измерения плотности вещества, чувствительным элементом которого является плоский конденсатор.

Датчик расхода вещества РТС 10 (рис. 19.19) имеет полый корпус 1 с фланцами на концах.

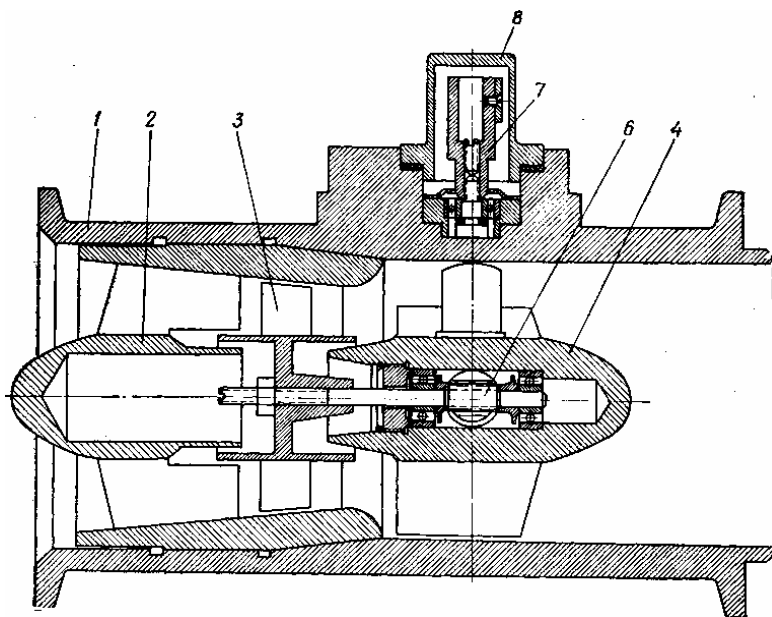


Рис. 19.19. Внутреннее устройство датчика расхода:

1 – корпус; 2, 4 – струевыпрямители; 3 – крыльчатка; 6 – ось с червяком, на котором закреплена втулка с сердечником; 7 – индукционная катушка; 8 – колпачок

Вещество из магистрали, поступая в датчик расхода, проходит струевыпрямитель 2 и попадает на винтовые лопасти крыльчатки 3, приводя ее во вращательное движение.

Затем вещество проходит через второй струевыпрямитель 4 и далее через датчик плотномера поступает в магистраль.

Струевыпрямители выравнивают поток вещества до и после крыльчатки, что способствует получению линейной зависимости (пропорциональности) между скоростью потока и числом оборотов крыльчатки.

Лопастни крыльчатки закреплены на оси, которая установлена в шарикоподшипниках в струевыпрямителе 4. Вещество, попадая на лопасти, вращает ось. Лопасти крыльчатки расположены под углом к направлению движения потока вещества.

Максимальному расходу вещества датчика соответствует определенное число оборотов крыльчатки.

Для регулировки скорости вращения крыльчатки на заданное число оборотов крыльчатке и каналу, в котором она вращается, придается коническая форма. Так как поток вещества при постоянном расходе в разных сечениях канала имеет различную скорость, то для изменения числа оборотов производится перемещение крыльчатки вдоль канала в осевом направлении.

Перемещение крыльчатки к выходному струевыпрямителю приводит ее в зону увеличенной скорости потока и, следовательно, к увеличению числа оборотов крыльчатки. И, наоборот, перемещение крыльчатки к входному струевыпрямителю приводит ее в зону пониженной скорости потока и, следовательно, к уменьшению числа оборотов.

Через червячную передачу 6, расположенную внутри выходного струевыпрямителя, крыльчатка вращает с замедлением в 30 раз втулку со стальным сердечником, расположенную внутри защитного колпачка 8. С внешней его стороны расположены одна над другой две индуктивные катушки 7 со стальными П-образными пластинами сердечника, обмотки которых представляют два плеча индуктивного моста.

За один оборот сердечника происходит одно изменение индуктивности нижней катушки, и, следовательно, мост, составленный из катушек индуктивности датчика и обмоток трансформатора усилителя УИП4-1, выходит из равновесия.

По своему принципу действия скоростной датчик расхода вещества является объемным прибором, т. е. с помощью скоростного датчика запас может быть измерен непосредственно в объемных едини-

цах. Крыльчатка датчика рассчитана таким образом, что при прохождении через датчик 1,538 л вещества его индуктивно-импульсное устройство посылает один импульс тока в электромагнит показывающего прибора, или 1 л вещества, прошедшего через датчик, соответствует 0,65 импульса.

Число импульсов тока на килограмм вещества зависит от плотности вещества и определяется по формуле

$$K_1 = \frac{K_2}{\rho},$$

где  $K_1$  – количество импульсов на 1 кг вещества;

$K_2$  – количество импульсов на 1 л вещества;

$\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>.

Для начального уравновешивания индуктивного моста в датчике предусмотрен магнитный шунт, укрепленный стопорным винтом около верхней катушки индуктивности. Положение магнитного шунта устанавливается при регулировке моста на заводе.

*Датчик плотномер ДПЕ 3-1* представляет собой плоский воздушный конденсатор  $C_d$ , электрическая емкость которого пропорциональна плотности вещества  $\rho_d$ , омывающего его пластины и заполняющего пространство между ними.

Датчик плотномер (рис. 19.20) состоит из корпуса 2 с розетками 3 и двух пакетов пластин 1. Пакеты пластин установлены в корпусе и закреплены с двух сторон кольцами. Каждый пакет пластин соединен с розетками проводниками через токоведущие стержни проходных изоляторов.

На концах корпуса имеются фланцы для крепления с одной стороны к датчику расхода и с другой – к патрубку трубопровода.

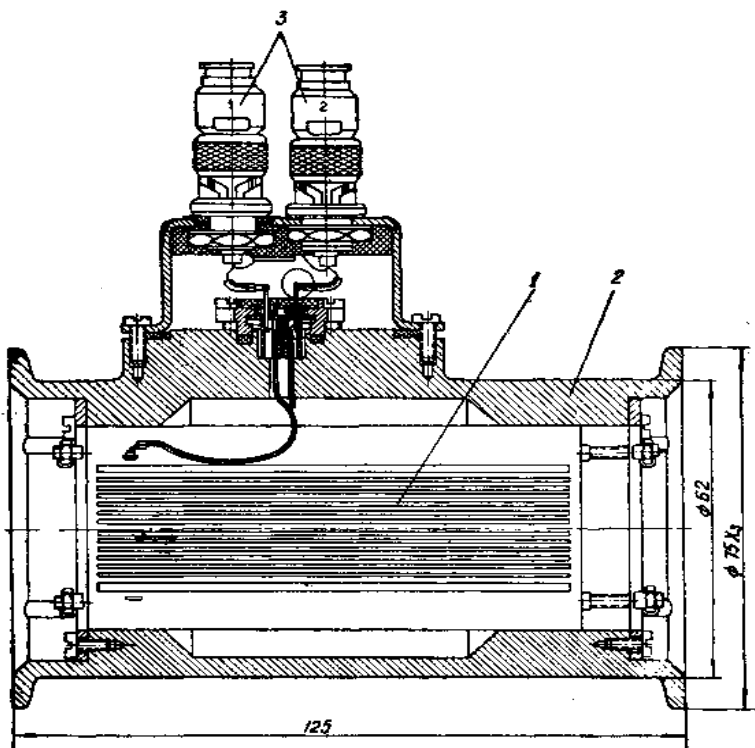


Рис. 19.20. Внутреннее устройство датчика плотнмера:  
 1 – пакет пластин; 2 – корпус; 3 – розетки

### **Усилитель импульсный с питанием УИП 4-1**

Усилитель УИ 4-1 (рис. 19.21) состоит из следующих функциональных каскадов: амплитудного детектора, компаратора напряжения, усилителя мощности.

Амплитудный детектор, выполненный по схеме выпрямителя с удвоением напряжения на диодах У1-1, У1-2 и конденсаторах С1, С2, выделяет на резисторе R1 низкочастотную составляющую напряжения сигнала датчика положительной полярности, которая суммируется с напряжением термокомпенсирующей цепи и подается на вход 9 компаратора напряжения. На вход 10 компаратора подается опорное напряжение с делителя, образованного резисторами R3 и R4.

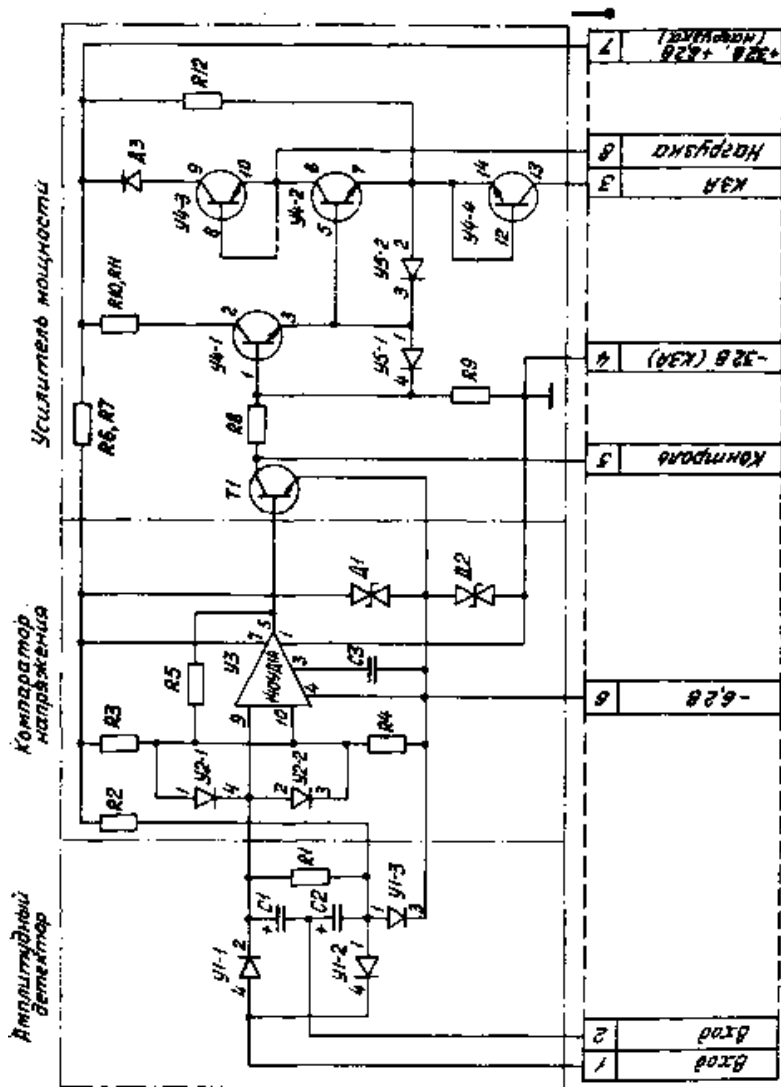


Рис. 19.21. Электрическая принципиальная схема УИ4-1

При равенстве напряжений на входах 9 и 10 изменяется полярность выходного напряжения компаратора, при этом открываются транзистор Т1 и одновременно с ним транзисторы У4-1 и У4-2, через обмотку электромагнита показывающего прибора начинает протекать ток. Ток через обмотку электромагнита протекает до момента, когда напряжение на входе 10 компаратора не станет больше напряжения на входе 9. При этом компаратор напряжения возвращается в исходное состояние, его выходное напряжение запирает транзистор Т1 и, соответственно, транзисторы У4-1 и У4-2.

Таким образом, на выходе усилителя формируются импульсы прямоугольной формы.

Резистор R5 в цепи положительной обратной связи определяет напряжение отпускания усилителя. Цепь, состоящая из резистора R2 и диода У1-3, обеспечивает температурную стабилизацию напряжений срабатывания и отпускания. Защита входов компаратора от перенапряжений производится диодами У2-1 и У2-2.

Питание компаратора осуществляется от параметрического стабилизатора, выполненного на стабилитронах Д1, Д2 и резисторах R6, R7.

Усилитель мощности выполнен на транзисторах Т1, У4-1, У4-2 и работает в режиме переключения. Наличие транзистора Т1 обеспечивает стабильность режима компаратора по выходному току при подключении дублирующего усилителя.

Резисторы R8, R9 являются коллекторной нагрузкой транзистора Т1.

Резисторы R8, R10 и R11 обеспечивают режим насыщения транзисторов У4-1 и У4-2.

Режим отсечки транзистора Т1 обеспечивается выходным напряжением компаратора, режим отсечки транзисторов У4-1, У4-2 – напряжением смещения, снимаемым с делителя, образованного транзистором У4-4 в диодном включении и резистором R12.

Стабильность режима отсечки при повышенной температуре окружающей среды обеспечивается диодами У5-1, У5-2.

Транзистор У4-3 в диодном включении и диод Д3 защищают транзистор от перенапряжений.

Питание УИ4-1 в усилителе УИП4-1 осуществляется от силового трансформатора TV2 (рис. 19.22) через выпрямитель, состоящий из диодов VD7 и VD8 и фильтрующих емкостей С3 и С4. Напряжение питающей сети 115 В, 400 Гц. Конденсатор С5 в блоке УИП4-1,

включенный параллельно первичной обмотке трансформатора TV2, служит для подавления сигнала радиопомех.

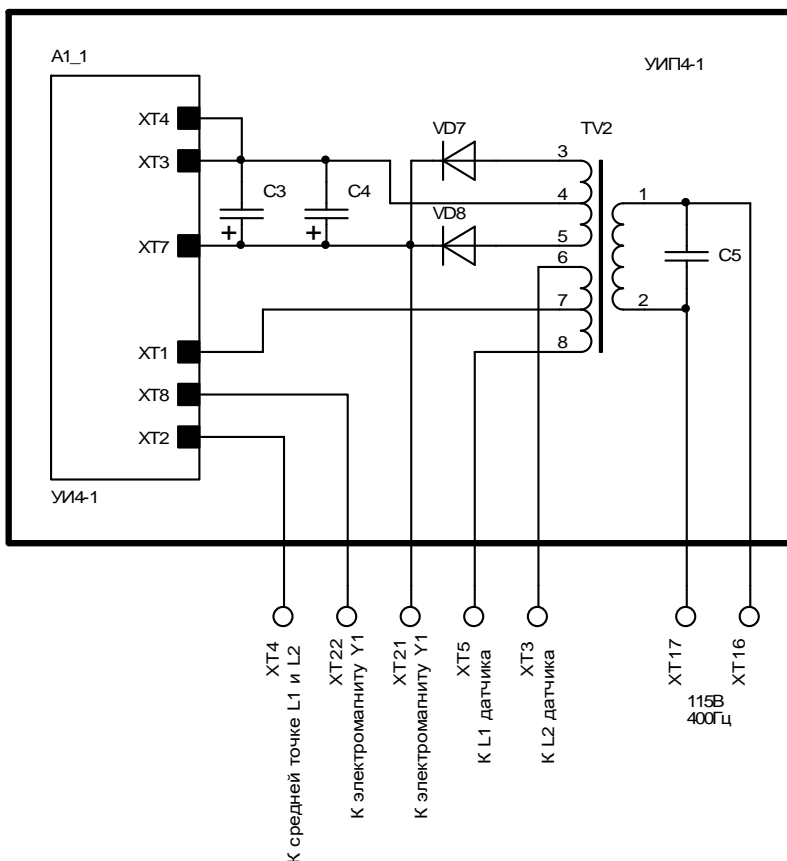


Рис. 19.22. Электрическая схема питания усилителя УИ4-1

### ***Принцип работы лабораторного стенда***

Принцип работы лабораторного стенда (см. рис. 19.19) заключается в том, что измеряемое вещество, протекая через датчик расхода с некоторой скоростью, приводит во вращение крыльчатку, скорость вращения которой в широких пределах пропорциональна часовому расходу измеряемого вещества, а число оборотов – количе-



ству протекшего через датчик измеряемого вещества в объемных единицах. Вращение крыльчатки преобразуется индуктивно-импульсным устройством в импульсы переменного тока.

При измерении расхода вещества электрические сигналы от индуктивно-импульсного устройства датчика расхода усиливаются и с помощью якоря электромагнита ЭМ в показывающем приборе преобразуются в перемещение стрелки по шкале  $L_2$ , которое пропорционально массе вещества  $P_{0,8}$ , протекшего через датчик при плотности вещества  $0,8 \text{ г/см}^3$ .

Формула, которую реализует лабораторный стенд:

$$P_{\text{п}} = P_3 - \left[ \frac{N}{K} + \sum_{n=0}^m \Delta V_{\text{const}} (\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{р}}) \right],$$

где  $P_{\text{п}}$  – оставшийся запас вещества по шкале показывающего прибора, кг;

$P_3$  – заданное (исходное) количество вещества, кг;

$N$  – количество импульсов, посылаемых датчиком расхода в показывающий прибор;

$K$  – расчетное количество импульсов, соответствующее 1 кг вещества при плотности вещества  $0,8 \text{ г/см}^3$ ;

$\Delta V_{\text{const}}$  – объем вещества, на который вносится поправка;

$\rho_{\text{д}}$  – действительная плотность вещества в момент внесения  $n$ -й поправки,  $\text{г/см}^3$ ;

$\rho_{\text{р}}$  – расчетная плотность, равная  $0,8 \text{ г/см}^3$ ;

$m$  – число поправок на количество вещества, прошедшего через датчик.

Специальное устройство, состоящее из датчика плотномера ДПЕ 3-1, включенного в измерительный мост, усилителя и исполнительного двигателя, корректирует показания показывающего прибора в зависимости от изменения плотности вещества.

Датчик плотномера подключен к самобалансирующемуся измерительному мосту и в зависимости от плотности вещества движок реостата, связанный с осью ротора двигателя, занимает вполне определенное положение.

Поправка по плотности вносится периодически через определенные порции израсходованного вещества (250 л) в виде дополни-

тельного углового перемещения стрелки показывающего прибора  $\Delta\alpha$ , пропорционального отклонению действительной плотности от расчетной –  $\Delta\rho$ .

При внесении поправки датчик плотномера отключается контактами реле от измерительного моста и вместо него подключается замещающая емкость, соответствующая плотности вещества  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Параметры моста подобраны таким образом, что при подключении замещающей емкости движок реостата занимает среднее положение.

Напряжение 27 В одновременно подается на рабочую обмотку электромагнитной муфты М, соединяющей через дифференциал ротор двигателя со стрелкой показывающего прибора.

Стрелка показывающего прибора перемещается на дополнительный угол  $\pm\alpha L$ , пропорциональный разности расчетной и действительной плотностей.

### **Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда**

Крыльчатка в датчике расхода через редуктор вращает стальной сердечник индуктивно-импульсного устройства, включенного в мост переменного тока.

Два плеча моста (рис. 19.23), составленные из катушек индуктивности L1 и L2, находятся в датчике, а два других плеча L3 и L4, образованные вторичными обмотками 6–7 и 7–8 трансформатора TV2, находятся в усилителе УИП4-1.

Обмотки L1, L3 и L4 имеют постоянную индуктивность, а L2 – переменную, изменяющуюся за счет того, что во время работы датчика в магнитном поле катушки вращается стальной сердечник, через редуктор связанный с крыльчаткой. При вращении этот сердечник приближается к П-образному сердечнику катушки индуктивности или удаляется от него и изменяет магнитный поток, а следовательно, и ее индуктивность.

Благодаря изменению индуктивности катушки L2 нарушается равновесие моста, а в его диагонали появляется напряжение с частотой, равной частоте питающего напряжения (400 Гц).

Это напряжение подается на вход УИ4-1 (см. рис. 19.21), нагрузкой которого является обмотка электромагнита (см. рис. 19.16) показывающего прибора.

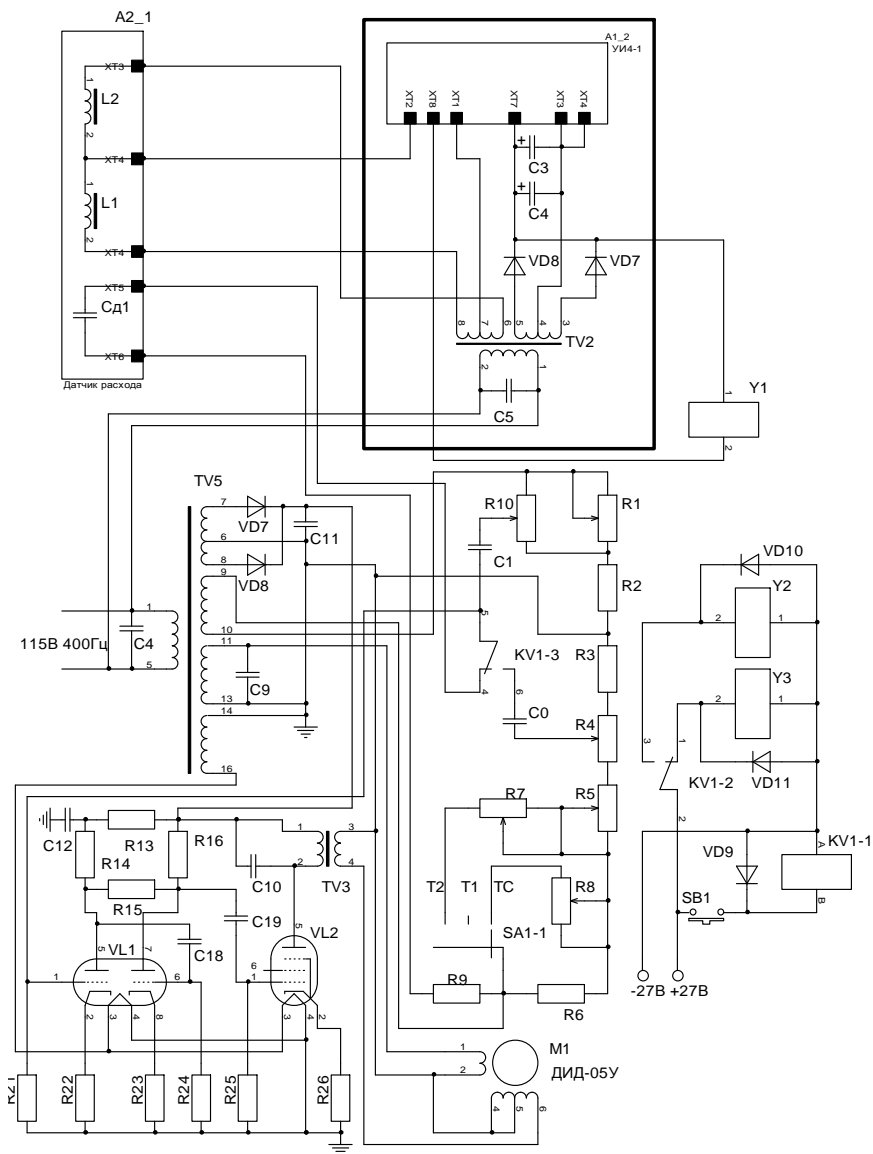


Рис. 19.23. Электрическая схема лабораторного стенда

Работа расходомера происходит следующим образом: после заправки определенного объема измеряемым веществом стрелка, с помощью которой производится отсчет запаса (остатка) вещества, устанавливается на значение, соответствующее количеству заправленного вещества (в килограммах).

По трубопроводу, в который вмонтирован датчик расхода, прокачивается вещество, которое, протекая через датчик, приводит во вращение крыльчатку. Вращающаяся крыльчатка через червячную передачу вращает сердечник.

Число оборотов сердечника индуктивно-импульсного устройства датчика пропорционально числу оборотов крыльчатки, следовательно, число срабатываний электромагнита (см. рис. 19.16) показывающего прибора также будет пропорционально числу оборотов крыльчатки и, соответственно, количеству вещества, прошедшего через датчик. Электромагнит показывающего прибора, срабатывая, поворачивает на один зуб храповое колесо, которое через редуктор и дифференциал передвигает стрелку по шкале показывающего прибора в сторону уменьшения количества залитого вещества.

Как было описано выше, передаточное отношение редуктора выбирается таким образом, что угол поворота стрелки пропорционален количеству вещества, прошедшего через датчик в объемных единицах, умноженному на 0,8, т. е. пропорционален массе вещества, прошедшего через датчик при средней расчетной плотности вещества, равной  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Однако плотность вещества может быть отличной от  $0,8 \text{ г/см}^3$ . Практически для применяемого вещества плотность может меняться от 0,7 до  $0,9 \text{ г/см}^3$ .

Для устранения возможной погрешности из-за разницы между средней расчетной плотностью, равной  $0,8 \text{ г/см}^3$ , и фактической плотностью вещества в расходомере предусмотрено корректирующее устройство, которое производит периодическое измерение фактической плотности вещества и вносит поправки на разность плотностей фактической и расчетной.

Основу корректирующего устройства составляет датчик плотномера (см. рис. 19.20) и измерительный мост с отработкой (см. рис. 19.17).

Чувствительным элементом всего корректирующего устройства служит датчик плотномера, через который проходит расходуемое вещество.

Как известно, емкость  $C_d$  датчика плотномера зависит от геометрических размеров пластин и диэлектрической проницаемости вещества, находящегося между ними.

Для плоского конденсатора

$$C_d = K \frac{\varepsilon S}{d},$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от выбора единиц;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

$S$  – площадь обкладок;

$d$  – расстояние между обкладками.

Если  $K$ ,  $S$  и  $d$  – величины постоянные, то  $C_d$  будет зависеть только от диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ .

Так как для Т-1, Т-2, ТС-1 (разновидность веществ)  $\varepsilon$  практически пропорциональна плотности основного вещества:

$$\rho = \varepsilon = K_1 \rho,$$

то можно написать, что емкость

$$C_d = KK_1 \frac{\rho S}{d},$$

откуда плотность вещества определяется как

$$\rho = \frac{1}{KK_1} \frac{C_d d}{S},$$

но так как  $\frac{1}{KK_1} \frac{d}{S} = K_3$  – величина практически постоянная, то плотность вещества

$$\rho = K_3 C_d.$$

Таким образом, по емкости конденсатора, полностью залитого веществом, можно судить о плотности вещества, если заданы конструктивные параметры конденсатора.

## Порядок выполнения экспериментальной части работы

1. Изучить структурную схему, устройство и принцип действия лабораторного стенда.
2. Получить допуск к работе.
3. К сети 220 В подключить лабораторный стенд и осциллограф.
4. Регулятор частоты вращения крыльчатки 7 (см. рис. 19.15) вывести в крайнее левое положение.
5. Включить питание осциллографа.
6. Тумблером 1 включить питание лабораторного стенда.
7. С помощью кабеля подключить осциллограф к паре гнезд № 1 (разъем для снятия осциллограмм 9).
8. Снять и изобразить полученные осциллограммы. Определить амплитуду и частоту полученного сигнала.
9. Подключить осциллограф к паре гнезд № 2.
10. Повторить пункт 8.
11. Подключить осциллограф к паре гнезд № 3.
12. Повторить пункт 8.
13. В показывающем приборе 2 с помощью кремальеры сместить стрелку нулевого деления на значение 6000 кг.
14. Повернуть регулятор частоты вращения крыльчатки 7 по часовой стрелке, установив значение на вольтметре 3, равное 5 В, и убедиться в работе показывающего прибора 2 по щелчкам электромагнита.
15. Повторить пункты 7–12.
16. Повернуть регулятор частоты вращения крыльчатки 7 по часовой стрелке, установив на вольтметре 3 значение, равное 15 В.
17. Повторить пункты 7–12.
18. Повернуть регулятор частоты вращения крыльчатки 7 по часовой стрелке, установив на вольтметре 3 значение, равное 25 В.
19. Повторить пункты 7–12.

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Инструменты и принадлежности.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица с результатами измерений.

5. Осциллограммы полученных сигналов.
6. Выводы по проделанной работе.

### **Список литературы**

1. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Москва: Высшая школа, 1988. – 88 с.
2. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – Москва: Радио и связь, 1986. – 74 с.
3. Справочник по радиоэлектронике: в 2 т. / под общ. ред. А. А. Куликовского. – Москва: Энергия, 1968. – Т. 2. – 484 с.
4. Браславский, Д. А. Расчет и конструкция авиационных приборов / Д. А. Браславский, С. С. Логунов, Д. С. Пельпор. – Москва, 1954. – 584 с.

## Содержание

Лабораторная работа № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОПЛАВКОВОГО ТОПЛИВОМЕРА.....	3
Лабораторная работа № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ С РЕЗИСТИВНЫМИ ПЕРВИЧНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ.....	10
Лабораторная работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ .....	20
Лабораторная работа № 14 ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ ТЕРМОРЕЗИСТОРОВ.....	29
Лабораторная работа № 15 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛЬТМЕТРА НА РЕЖИМ РАБОТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ .....	51
Лабораторная работа № 16 ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ.....	80
Лабораторная работа № 18 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОКОМПЕНСАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	92
Лабораторная работа № 19 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, МОДУЛИРОВАННЫЕ ПО АМПЛИТУДЕ .....	103



Учебное издание

## **ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ**

Лабораторный практикум  
для студентов специальности 1-38 01 01  
«Механические и электромеханические приборы и аппараты»

Составители:

**НОВИКОВ** Александр Анатольевич

**ГАБЕЦ** Вячеслав Леонидович

Редактор *Т. Н. Микулик*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 26.06.2017. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 7,91. Уч.-изд. л. 6,18. Тираж 100. Заказ 780.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.