



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1974

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

(С ЛАБОРАТОРНЫМИ РАБОТАМИ)

Изд. 2-е, переработанное и дополненное

*Допущено Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника для средних  
специальных учебных заведений*

В. С. ПОПОВ

Попов В. С.

П 58 Электрические измерения (с лабораторными работами). Учебник для техникумов. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., «Энергия», 1974.

400 с. с ил.

В книге рассмотрены аналоговые и цифровые приборы и методы измерения тока, напряжения, сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности, емкости, мощности, энергии, сдвига фаз и частоты, магнитные измерения, измерения неэлектрических величин электрическими методами.

Специальная глава посвящена лабораторным работам по электрическим измерениям.

Книга является учебником для энергетических и электромеханических техникумов приборостроительных специальностей. Она может служить пособием для инженерно-технических работников.

П  $\frac{3313-009}{051(01)-74}$  140-74

6П2.1.083

© Издательство «Энергия», 1974 г.

6П2.1.083

П 58

621.317

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является учебником по электрическим измерениям для энергетических и электромеханических техникумов приборостроительных специальностей.

Содержание ее соответствует программе указанного курса. В книге изложены сведения об электроизмерительных приборах и методах измерений основных электрических, магнитных и неэлектрических величин.

Во второе издание книги внесены все необходимые изменения, связанные с введением в действие ГОСТ 16263-70 «Метрология, термины и определения» и наличием проекта ГОСТ «Единицы физических величин», а также изменения, рекомендованные отделом электрорадиотехнических специальностей научно-методического кабинета по среднему специальному образованию МВ и ССО СССР.

Наибольшим дополнениям и изменениям подверглись гл. 1 и 5 (цифровые приборы).

В гл. 14 даны методические указания к работам в лаборатории электрических измерений и описания 20 лабораторных работ, отсутствовавших в первом издании книги.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук В. М. Агапову за помощь и участие в работе над книгой как в предыдущих, так и в настоящем изданиях.

Автор весьма признателен преподавателю Всесоюзного заочного электромеханического техникума Л. П. Любимовой за доброжелательную критику и ценные указания при рецензировании книги, а также инженеру Б. Р. Шульману за большую работу по редактированию книги.

*Автор*

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения являются одним из основных средств познания природы, ее явлений и законов.

Особенно важную роль играют электрические измерения, так как теоретическая и прикладная электротехника имеет дело с различными электрическими и магнитными величинами и явлениями, которые не воспринимаются непосредственно нашими органами чувств. Поэтому обнаружение присутствия этих величин, количественное определение их, а также изучение электрических и магнитных явлений возможно только при помощи электроизмерительных приборов.

Любая электроустановка может работать нормально, если все составляющие ее элементы: генераторы, приемники энергии, передающие, преобразующие и другие устройства и приборы — удовлетворяют определенным техническим требованиям. Проверка выполнения указанных требований производится при помощи электроизмерительных приборов. Эта проверка производится не только в процессе монтажа и эксплуатации установки, но и в процессе изготовления отдельных ее звеньев: электрических машин, трансформаторов, аппаратов, приборов и т. п.

Установку и проверку режима работы электроустановки, который определяется напряжениями, токами, мощностями и другими величинами, действующими в отдельных цепях, можно производить только при помощи электроизмерительных приборов.

Быстро развивающейся областью измерительной техники является измерение неэлектрических величин электрическими приборами и методами. Это объясняется возможностью непрерывного измерения и записью его результатов на расстоянии, высокой точностью, чувствительностью и другими положительными свойствами электрических методов и приборов измерения.

В современном производстве соблюдение любого технологического процесса и автоматизация управления обес-

печиваются применением измерительной техники и тесно связанной с ней автоматики.

Таким образом, электрические измерения обеспечивают рациональное ведение любых технологических процессов, бесперебойную работу электроустановок и т. п., а следовательно, улучшают технико-экономические показатели работы предприятия.

Зародившаяся и выросшая за годы Советской власти отечественная электроприборостроительная промышленность выпускает в настоящее время все необходимые для науки и техники контрольно-измерительные приборы.

Задача настоящей книги — познакомить читателя с основными положениями измерительной техники, с рациональным выбором и применением электроизмерительных приборов.

## Глава первая

# ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 1-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

#### а) Общие сведения

Наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и достижения требуемой точности называется метрологией.

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств — мер и измерительных приборов. Результат измерения выражают именованным числом, состоящим из числа и названия единицы измерения, например напряжение равно 127 В.

Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительным прибором называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительная информация — это информация о значениях измеряемых величин.

Меры и приборы делятся на рабочие и образцовые. Первые из них применяются для практических измерений, не связанных с передачей размера единиц другим мерам и приборам, вторые, утвержденные в качестве образцовых, — для поверки по ним других средств измерений.

Истинное значение физической величины — это такое ее значение, которое идеальным образом отражает (качественно и количественно) физическую вели-

чину. Истинное значение величины остается неизвестным вследствие отсутствия идеальных средств измерения, поэтому на практике вместо истинного значения применяют действительное значение величины.

Под действительным значением физической величины понимают ее значение, найденное экспериментально и настолько близкое к истинному значению, что может быть использовано вместо него.

Результатом измерения, или измеренным значением, называется значение величины, найденное при ее измерении.

Абсолютная погрешность измерения  $\Delta A$  — это отклонение результата измерения  $A_{из}$  от истинного (или действительного) значения измеренной величины  $A$ :

$$\Delta A = A_{из} - A. \quad (1-1)$$

Отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины, выраженное в процентах, представляет собой относительную погрешность измерения:

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%. \quad (1-2)$$

В большинстве случаев абсолютная погрешность  $\Delta A = A_{из} - A$  мала, следовательно, результат измерения  $A_{из}$  мало отличается от  $A$ , поэтому для практических расчетов в знаменателе формулы погрешности (1-2) истинное значение  $A$  можно заменить результатом измерения  $A_{из}$ .

**Пример 1-1.** Результат измерения напряжения  $U_{из} = 222$  В. Действительное значение напряжения  $U = 220$  В.

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta U = U_{из} - U = 222 - 220 = 2 \text{ В.}$$

Относительная погрешность измерения

$$\gamma_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{2}{220} \cdot 100\% \approx 2\%.$$

## б) Методы измерений

В зависимости от способа получения результата измерения делятся на прямые и косвенные.

Прямыми измерениями называются такие, при которых искомое значение величины находится непосредственно из опытных данных. Примерами прямых

измерений являются измерения тока амперметром, напряжения — вольтметром и т. д.

К освенным измерениям называются такие, при которых определяемая величина не измеряется непосредственно, а искомое значение ее находится подсчетом на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например, сопротивление  $r$  находится по закону Ома  $r = U/I$  после измерения величин напряжения  $U$  и тока  $I$ .

Метод измерения — это совокупность приемов использования средств измерений и принципов измерений, т. е. физических явлений, на которых основаны измерения. При измерениях электрических величин применяются различные методы измерений, главными из которых являются методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Под методом непосредственной оценки понимают метод, в котором значение измеряемой величины определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора (прямого действия), например измерение тока амперметром.

Метод сравнения (с мерой) — это метод, в котором измеряемая величина сравнивается с величиной воспроизводимой мерой, например измерение э. д. с. путем сравнения ее с мерой э. д. с. — э. д. с. нормального элемента.

К разновидностям метода сравнения относятся дифференциальный метод, нулевой метод, метод замещения и др.

Дифференциальный метод. Метод сравнения с мерой, в котором прибор измеряет разность измеряемой величины и известной величины, воспроизводимой мерой.

Нулевой метод. Метод сравнения с мерой, в которой результирующий эффект воздействия измеряемой и известной величин на прибор сравнения доводится до нуля. Примером может служить одинарный мост для измерения сопротивлений.

Метод замещения. Метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина замещается известной величиной, воспроизводимой мерой.

В электротехнике при относительно невысокой точности измерений (0,2—10%) наиболее часто применяются ме-



годы непосредственной оценки как наиболее простые, требующие наименьшей затраты времени. Методы сравнения применяются обычно в лабораторной практике для получения более точных результатов измерения (0,01—0,1 %).

При косвенных измерениях погрешность всегда больше, чем при прямых. Это выгодно отличает прямые измерения.

### в) Погрешности измерений

При любом измерении результат измерения отличается от истинного значения величины вследствие несовершенства средств и методов измерения, субъективных ошибок экспериментатора и из-за различных случайных влияний на результат измерения. Поэтому при всяком измерении, кроме результата измерения, необходимо определять и точность измерения, т. е. качество измерения, отражающее близость результата измерения к истинному значению величины. Высокой точности измерения соответствует малая погрешность и, наоборот, большой погрешности — низкая точность измерения.

Результат измерения обычно записывают в виде суммы двух величин: одной — найденного значения измеренной величины и второй — наибольшей возможной абсолютной или относительной погрешности измерения, т. е.

$$A = A_{из} \pm \Delta A \text{ или } A = A_{из} \pm \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% = A_{из} \pm \gamma_A. \quad (1-3)$$

Такая запись показывает, что истинное значение измеренной величины может отличаться от найденного значения ее не более чем на  $\Delta A$  или  $\gamma_A$ .

Погрешности измерений делят на систематические, случайные и грубые.

Под систематическими понимают погрешности измерения, остающиеся постоянными или закономерно изменяющимися при повторных измерениях одной и той же величины. Систематическую погрешность можно определить, и влияние ее на результат измерения устранить введением поправки. К систематическим погрешностям относятся, например, инструментальные погрешности, зависящие от погрешностей применяемых средств измерений, погрешности установки, вызванные неправильной установкой прибора; методические погрешности, происходящие от несовершенства метода измерения, и др.

**Поправка** — это значение величины  $\delta A$ , которое надо прибавить к измеренному значению  $A_{из}$  с целью исключения систематической погрешности. Таким образом, истинное значение величины равно:

$$A = A_{из} + \delta A,$$

или поправка

$$\delta A = A - A_{из} \quad (1-4)$$

Под случайными погрешностями понимают погрешности, изменяющиеся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Они происходят от влияния на результат измерения причин случайного характера, например погрешность округления при отсчете показаний измерительного прибора или от влияния окружающей среды. Случайные погрешности обнаруживаются тем, что при повторных измерениях одной и той же величины получаются неодинаковые результаты.

**Грубая погрешность** — это погрешность измерения, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях, например неправильный отсчет по прибору, неправильная запись показаний и т. п. Наблюдения, содержащие грубые погрешности измерений, обычно отбрасываются.

*Определение погрешности отдельного измерения при методе непосредственной оценки.* Рассмотрим, как вычисляется погрешность измерения, когда измеряемая величина определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия.

Основной погрешностью прибора называется погрешность прибора, находящегося в нормальных условиях работы, т. е. при нормальном положении его, температуре  $20 \pm 5^\circ \text{C}$ , отсутствии внешнего электрического и магнитного полей, кроме земного, и т. п.

В стандартах обычно нормируются так называемые приведенные погрешности прибора, представляющие собой выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности прибора  $\Delta A$  к верхнему пределу измерительного прибора или, что то же, к номинальной величине прибора  $A_{н}$ .

На шкалах измерительных приборов указывается цифра класса точности прибора, обозначающая основную наибольшую допустимую приве-

денную погрешность прибора (§ 1-4, ж). Таким образом,

$$\gamma_d = \Delta A_{\text{наиб}} / A_n. \quad (1-5)$$

Из (1-5) следует, что наибольшая абсолютная погрешность, которую может иметь прибор в любой точке шкалы, а следовательно, и наибольшая возможная абсолютная погрешность  $\Delta A_{\text{н. в}}$  при измерении какой-либо величины этим прибором могут быть выражены:

$$\Delta A_{\text{наиб}} = \Delta A_{\text{н. в}} = \gamma_d A_n / 100\%.$$

Выражая в процентах отношение наибольшей возможной абсолютной погрешности к найденному (или действительному) значению измеряемой величины, получаем наибольшую возможную относительную погрешность измерения

$$\gamma_{\text{н. в}} = \frac{\Delta A_{\text{н. в}}}{A} \cdot 100\% = \frac{\gamma_d A_n}{100\% A} \cdot 100\% = \pm \gamma_d \frac{A_n}{A}. \quad (1-6)$$

Таким образом, для нахождения наибольшей возможной относительной погрешности при измерении величины по показанию прибора необходимо основную допустимую приведенную погрешность прибора умножить на отношение номинальной величины прибора к найденному значению измеряемой величины.

**Пример 1-2.** Определить погрешность при измерении тока амперметром класса точности 1,5, если номинальный ток амперметра  $I_n = 50$  А, а показание амперметра  $I = 20$  А.

Наибольшая возможная погрешность при измерении тока составляет:

$$\gamma_I = \gamma_d \frac{I_n}{I} = \pm 1,5\% \frac{50}{20} = \pm 3,75\%.$$

Таким образом, измеренное значение тока  $I = 20$  А может отличаться от действительного значения этого тока не более чем на  $\pm 3,75\%$  найденного значения.

Чем меньше измеряемая величина по сравнению с номинальной величиной прибора, тем больше погрешность измерения этой величины. Следовательно, для получения достаточной точности измеряемая величина должна иметь значение не меньше одной трети номинальной величины прибора.

*Определение погрешности отдельного измерения при косвенных методах измерения.* Допустим, что искомая величина  $A$  и измеренные методом непосредственной

оценки вспомогательные величины  $B$  и  $C$  связаны соотношением

$$A = B^n C^m, \quad (1-7)$$

где  $n$  и  $m$  — показатели степени, которые могут быть целыми, дробными, положительными или отрицательными.

Взяв логарифмы правой и левой частей уравнения (1-7), получим:

$$\ln A = n \ln B + m \ln C.$$

Продифференцировав написанное выражение, найдем:

$$\frac{dA}{A} = n \frac{dB}{B} + m \frac{dC}{C}.$$

Заменив дифференциалы  $dA$ ,  $dB$  и  $dC$  малыми приращениями, которые можно рассматривать как абсолютные погрешности, можно написать:

$$\frac{\Delta A}{A} = n \frac{\Delta B}{B} + m \frac{\Delta C}{C}$$

или

$$\gamma_A = n\gamma_B + m\gamma_C, \quad (1-8)$$

где  $\gamma_A = \Delta A/A$ ;  $\gamma_B = \Delta B/B$ ;  $\gamma_C = \Delta C/C$  — относительные погрешности величин  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

Последнее уравнение дает возможность, зная погрешности вспомогательных величин, определить погрешность искомой величины  $A$ . Так как погрешности могут быть положительными и отрицательными, то при определении наибольшей возможной погрешности следует всегда брать наиболее неблагоприятный случай, т. е. относительные погрешности в выражении (1-8) следует брать со знаком плюс.

**Пример 1-3.** Для измерения сопротивления  $r$  были измерены ток  $I$  в этом сопротивлении с погрешностью  $\gamma_I = \pm 1,5\%$  и мощность потерь в нем  $P$  с погрешностью  $\gamma_P = \pm 1\%$ .

Вычислить наибольшую возможную относительную погрешность при измерении сопротивления  $r$ .

Сопротивление

$$r = P/I^2 = PI^{-2}.$$

Относительная погрешность при измерении сопротивления

$$\gamma_r = \pm (\gamma_P + 2\gamma_I) = \pm (1 + 2 \cdot 1,5) = \pm 4\%.$$

Определим наибольшую возможную относительную погрешность искомой величины  $A$ , если она равна разности двух величин  $B$  и  $C$ , т. е.

$$A = B - C.$$

Обозначив абсолютные погрешности величин  $\Delta A$ ,  $\Delta B$  и  $\Delta C$ , можно написать:

$$A + \Delta A = (B + \Delta B) - (C - \Delta C),$$

Рассматривая разность левых и правых частей двух последних уравнений, получаем:

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C,$$

откуда

$$\gamma_A = \Delta A/A = (\Delta B + \Delta C)/(B - C). \quad (1-9)$$

В том случае, если разность  $B - C$  будет невелика,  $(B - C) \ll B$ , наибольшая возможная относительная погрешность искомой величины может быть чрезвычайно велика, поэтому при указанных соотношениях величин следует по возможности избегать косвенных измерений.

Аналогичным образом можно доказать, что если искомая величина равна сумме двух величин, т. е.

$$A = B + C,$$

то наибольшая возможная относительная погрешность результата будет выражаться формулой

$$\gamma_A = \Delta A/A = (\Delta B + \Delta C)/(B + C). \quad (1-10)$$

*Определение погрешности ряда измерений.* Уменьшение влияния случайных погрешностей на результат измерений достигается многократным измерением величины в одинаковых условиях и нахождением среднего арифметического из  $n$  измерений

$$A_0 = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}, \quad (1-11)$$

которое называется наиболее вероятным значением величины, так как случайные погрешности, одинаковые по абсолютной величине, но разные по знаку, получаются одинаково часто. Точность вероятного значения  $A_0$  можно характеризовать, например, вероятной погрешностью  $\Delta A_{0, \text{в}}$ , относительно которой можно сказать, что половина всех случайных погрешностей при повторных измерениях данной величины будет больше ее ( $\Delta A_{0, \text{в}}$ ), а половина — меньше ее.

Вероятная погрешность определяется по формуле \*

$$\Delta A_{0.в} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2}{n(n-1)}}, \quad (1-12)$$

где разность между результатами отдельного измерения и вероятным значением

$$\rho_1 = A_1 - A_0 \quad (1-13)$$

называется случайным отклонением или остаточной погрешностью.

Относительная вероятная погрешность

$$\gamma_{0.в} = \frac{\Delta A_{0.в}}{A_0} \cdot 100\%.$$

Погрешность

$$\Delta A_{0.пр} = 4,5 \Delta A_{0.в} \quad (1-14)$$

называется предельной погрешностью результата измерения.

Результат измерения можно записать так:

$$A = A_0 \pm \Delta A_{0.в}. \quad (1-15)$$

Эта запись означает, что при наиболее вероятном значении  $A_0$  измеряемой величины при ее повторных измерениях одинаково возможны погрешности как меньше  $\Delta A_{0.в}$ , так и больше  $\Delta A_{0.в}$ , но не превышающие  $\Delta A_{0.пр} = 4,5 \Delta A_{0.в}$ .

**Пример 1-4.** Искомое сопротивление было измерено 8 раз; при этом получены результаты:  $r_1 = 116,2$ ;  $r_2 = 118,2$ ;  $r_3 = 118,5$ ;  $r_4 = 117,0$ ;  $r_5 = 118,2$ ;  $r_6 = 118,4$ ;  $r_7 = 117,8$ ;  $r_8 = 118,1$  Ом.

Наиболее вероятное значение сопротивления [см. (1-11)]

$$r_0 = (r_1 + r_2 + \dots + r_8) / 8 = 117,8 \text{ Ом.}$$

Случайные отклонения (1-13)  $\rho_1 = r_1 - r_0 = -1,6$  Ом;  $\rho_2 = +0,4$ ;  $\rho_3 = +0,7$ ;  $\rho_4 = -0,8$ ;  $\rho_5 = +0,4$ ;  $\rho_6 = +0,6$ ;  $\rho_7 = 0,0$ ;  $\rho_8 = +0,3$  Ом.

Вероятная погрешность результата [см. (1-12)]

$$\Delta r_{0.в} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_8^2}{8 \cdot 7}} = 0,19 \text{ Ом} \approx 0,2 \text{ Ом.}$$

Предельная погрешность [см. (1-14)]

$$\Delta r_{0.пр} = 4,5 \Delta r_{0.в} = 4,5 \cdot 0,2 = 0,9 \text{ Ом.}$$

Окончательный результат измерения

$$r = r_0 \pm \Delta r_{0.в} = 117,8 \pm 0,2 \text{ Ом или } r = r_0 \pm \gamma_{r_{0.в}} = 117,8 \text{ Ом} \pm 0,16\%.$$

\* Формула (1-12) дается без вывода, последний дан в книге проф. М. Ф. Маликова «Основы метрологии», Стандартгиздат, 1949.

Из написанного следует: 1) наиболее вероятное значение измеренного сопротивления 117,8 Ом; 2) в данных условиях измерения одинаково часто будут погрешности как больше, так и меньше 0,2 Ом; 3) наибольшая погрешность в данных условиях будет не больше 0,9 Ом.

Иногда стремятся производить измерения наиболее точными приборами, не считаясь с условиями работы, от которых зависят случайные погрешности измерений.

Необходимо иметь в виду, что применять измерительные приборы высокой точности имеет смысл только тогда, когда относительная вероятная погрешность измерения, учитывающая влияние окружающей обстановки на точность измерения, будет меньше относительной наибольшей возможной погрешности измерения.

## 1-2. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

В основу Государственного стандарта СССР «Единицы физических величин» положены единицы Международной системы СИ. Согласно этому стандарту основными единицами являются метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин и кандела.

Для основных единиц установлены следующие определения:

**Метр (м)** — длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями  $2p_{10}$  и  $5d_5$  атома криптона-86.

**Килограмм (кг)** — масса, равная массе международного прототипа килограмма.

**Секунда (с)** — 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя световыми уровнями основного состояния атома цезия-133.

**Ампер (А)** — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  ньютон (Н) на каждый метр длины.

**Кельвин (К)** — единица термодинамической температуры —  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды.

**Кандела (кд)** — сила света, испускаемого с площади  $1/600\,000$  м<sup>2</sup> сечения полного излучателя, в перпендикулярном к этому сечению направлении, при темпе-

## Дополнительные и производные единицы и их обозначения

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы измерения		Размерность единицы
		русское	латинское или греческое	
<i>Дополнительные единицы</i>				
Плоский угол	радиан	рад	rad	—
Телесный угол	стерадиан	ср	sr	—
<i>Производные единицы</i>				
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	1 м <sup>2</sup>
Объем	кубический метр	м <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	1 м <sup>3</sup>
Частота	герц	Гц	Hz	1/1 с
Плотность (объемная масса)	киллограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	1 кг/1 м <sup>3</sup>
Скорость	метр в секунду	м/с	m/s	1 м/1 с
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с	rad/s	1 рад/1 с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	1 м/1 с <sup>2</sup>
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	рад/с <sup>2</sup>	rad/s <sup>2</sup>	1 рад/1 с <sup>2</sup>
Сила	ньютон	Н	N	1 кг · 1 м/1 с <sup>2</sup>
Давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр или Паскаль	Н/м <sup>2</sup> Па	N/m <sup>2</sup> Pa	1 кг/(1 м × 1 с <sup>2</sup> )
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж	J	1 в · 1 м
Мощность	ватт	Вт	W	1 Дж/1 с
Количество электричества, электрический заряд	кулон	Кл	C	1 А · 1 с
Электрическое напряжение, разность потенциалов, э. д. с.	вольт	В	V	1 вт/1 А
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м	V/m	1 В/1 м
Электрическое сопротивление	ом	Ом	Ω	1 В/1А



Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы измерения		Размерность единицы
		русское	латинское или греческое	
Электрическая емкость	фарада	Ф	F	1 Кл/1 В
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	Wb	1 Кл · 1 Ом
Индуктивность	генри	Г	H	1 Вб · 1 А
Магнитная индукция	тесла	Т	T	1 Вб/1 м <sup>2</sup>
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м	A/m	1 А/1 м
Магнитодвижущая сила (намагничивающая сила)	ампер	A	A	1 А
Световой поток	люмен	лм	lm	1 кд · 1 ср
Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>	1 кд/1 м <sup>2</sup>
Освещенность	люкс	лк	lx	1 лм/1 м <sup>2</sup>

ратуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Кроме основных единиц, устанавливаются дополнительные и производные единицы Международной системы, указанные в табл. 1-1.

Таблица 1-2

Приставки к единицам

Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение		Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение	
		русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом			русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом
Атто	10 <sup>-18</sup>	а	a	Деци	10 <sup>-1</sup>	д	d
Фемто	10 <sup>-15</sup>	ф	f	Дека	10	дк	da
Пико	10 <sup>-12</sup>	п	p	Гекто	10 <sup>2</sup>	г	h
Нано	10 <sup>-9</sup>	н	n	Кило	10 <sup>3</sup>	к	k
Микро	10 <sup>-6</sup>	мк	μ	Мега	10 <sup>6</sup>	М	M
Милли	10 <sup>-3</sup>	м	m	Гига	10 <sup>9</sup>	Г	G
Сантиметр	10 <sup>-2</sup>	с	c	Тера	10 <sup>12</sup>	Т	T

Для дополнительных единиц установлены следующие определения:

**Радиан** — угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми равна радиусу.

**Стерadian** — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Наименования кратных и дольных единиц образуются путем применения приставок, приведенных в табл. 1-2.

### 1.3. МЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

Средство измерения, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера другим средствам измерения и выполненное по особой спецификации, называется **эталоном**.

В зависимости от назначения эталоны делят на государственные, первичные, вторичные, эталоны-копии, эталоны сравнения и рабочие эталоны. Рабочие эталоны — это эталоны, предназначенные для передачи размера единицы образцовым средствам измерения или наиболее точным рабочим средствам измерения.

В СССР эталоны хранятся во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии (ВНИИМ) им. Д. И. Менделеева или в лабораториях органов Государственной (или ведомственной) метрологической службы.

а) *Мера тока — токовые весы*

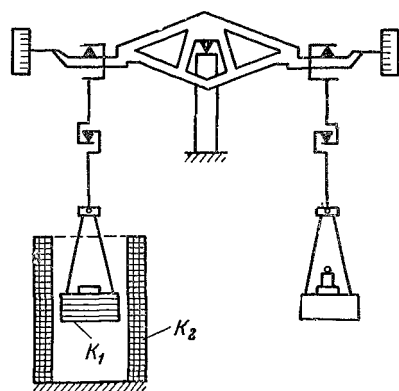


Рис. 1-1. Схема устройства токовых весов.

Токовые весы (рис. 1-1) имеют коромысло, на одном плече которого подвешена подвижная катушка  $K_1$ . Последовательно с ней соединена неподвижная катушка  $K_2$ .

При прохождении тока по катушкам  $K_1$  и  $K_2$  возникает сила их электродинамического взаимодействия, которая

уравновешивается эталонными гирями, нагружаемыми на второе плечо коромысла.

Исходя из данного выше определения единицы силы тока и геометрических размеров катушек подсчитывается значение силы взаимодействия между катушками при силе тока 1 А. Нагрузив второе плечо грузом найденного расчетного значения, регулируют силу тока в катушках до получения равновесия, при котором установившийся ток имеет значение 1 А.

Токовые весы ВНИИМ обеспечивают погрешность до 0,001 %.

### б) Мера э. д. с. — нормальный элемент (НЭ)

Нормальный элемент состоит из запаянного стеклянного Н-образного сосуда (рис. 1-2). Положительным электродом *А* служит ртуть, заполняющая нижнюю часть одной ветви сосуда, отрицательным электродом *Б* — амальгама кадмия (Cd — 12%, Hg — 88%), расположенная в нижней части другой ветви сосуда. Над положительным электродом расположена паста — деполяризатор *В* (смесь кристаллов сернокислого кадмия —  $CdSO_4 + 8/3 H_2O$  и сернокислой закиси ртути  $Hg_2SO_4$ ). Над пастой и отрицательным электродом расположены кристаллы сернокислого кадмия — *Г*. Электролитом служит водный раствор сернокислого кадмия — *Д*.

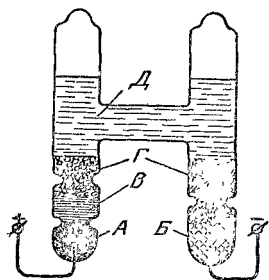


Рис. 1-2. Устройство нормального кадмиевого элемента.

Электродвижущая сила элемента в зависимости от температуры определяется по формуле

$$E_t = [E_{20} - 0,0000406 (t - 20^\circ)], \text{ В}, \quad (1-16)$$

где  $E_t$  — э. д. с. при температуре  $t$ ;

$E_{20}$  — э. д. с. при  $20^\circ\text{C}$ .

Значение э. д. с., например, для элементов класса точности 0,005 (ГОСТ 1954-64) при  $+20^\circ\text{C}$  составляет 1,0185 — 1,0187 В, а для класса 0,02 — 1,0186 — 1,0194 В.

Допустимое изменение э. д. с. за год для элементов класса 0,005 составляет 50 мкВ, а для класса 0,02 — 200 мкВ.

Внутреннее сопротивление НЭ равно 500 — 1500 Ом. Предельный допустимый ток для элементов класса 0,005 составляет 1 мкА, а для класса 0,02 10 мкА.

Нормальные элементы не следует применять при температурах ниже +5 и выше +30 °С; их нельзя переворачивать, подвергать толчкам и сотрясениям, а также допускать неодинаковый нагрев или охлаждению ветвей.

Элементы классов 0,001 и 0,002 применяются для особо точных метрологических работ и для поверки элементов класса 0,005, которые применяются для поверки приборов высокой точности и при точных лабораторных измерениях. При менее точных технических измерениях применяются элементы класса 0,02.

### в) Меры электрического сопротивления

Меры электрического сопротивления — образцовые резисторы или образцовые катушки сопротивления. Точность измерительных резисторов (катушек сопротивления) определяется по ГОСТ 6864-69, который делит их на классы: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02 и 0,05. Цифра класса точности катушки обозначает наибольшую допустимую погрешность, т. е. выраженное в процентах отношение разности между номинальным  $r_n$  и действительным  $r$  значениями меры к номинальному значению  $r_n$ , указанному на резисторе, т. е.

$$\gamma = \frac{r_n - r}{r_n} \cdot 100\%. \quad (1-17)$$

Рис. 1-3. Схема устройства катушки сопротивления.

Измерительные резисторы изготавливаются из манганиновой проволоки или ленты. Манганин — сплав: Cu — 84%, Ni — 4% и Mn — 12%. Он обладает малым температурным коэффициентом сопротивления (0,00001 1/°С), большим удельным сопротивлением (0,45 Ом·мм<sup>2</sup>/м) и малой термо-э. д. с. при контакте с медью (2 мкВ на 1 °С).

На рис. 1-3 показано устройство одной из катушек сопротивления. На латуновый или фарфоровый цилиндр А

наложена бифилярная (выполненная в два провода) обмотка, на концах которой расположены две пары зажимов  $I$  и  $U$ , укрепленные на эбонитовой панели  $B$ , к которой крепится кожух катушки  $B$ .

В других конструкциях обмотка крепится на цилиндрическом каркасе, припаиваемом к кожуху с внутренней стороны. Расположением обмотки между кожухом и каркасом достигается защита ее от влияния окружающей среды.

Токовыми зажимами  $I$  (рис. 1-4) резистор включается в цепь тока, зажимы  $U$ , называемые потенциальными, предназначены для измерения напряжения на сопротивлении резистора.

Образцовые резисторы изготавливаются на номинальные сопротивления 0,00001; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 100; 1 000; 10 000; 100 000 Ом.

Набор резисторов, заключенных в общий кожух и соединенных по определенной схеме, называется магазином резисторов или сопротивлений. Они применяются взамен образцовых катушек и для регулирования тока. Магазины резисторов по точности делятся на классы: 0,01; 0,02;

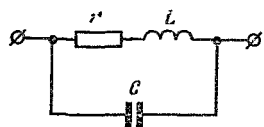


Рис. 1-6. Эквивалентная схема катушки сопротивления.

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. Образцовые катушки и магазины резисторов должны иметь возможно меньшие собственные индуктивность и емкость. На рис. 1-5 показана эквивалентная электрическая схема с учетом только собственной индуктивности катушки, а на рис. 1-6 учитывается также собственная емкость. При малых  $L$  и  $C$  сопротивление катушки на переменном токе  $Z = r + jx = ze^{j\varphi}$  близко к величине  $r$  (сопротивления ее на постоянном токе), так как мало реактивное сопротивление  $x$ .

Уменьшение реактивного сопротивления катушки  $x$  достигается применением специальных способов намотки катушек.

Качество катушки сопротивления оценивается ее постоянной времени  $\tau$ , величиной, не зависящей от частоты.

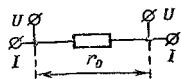


Рис. 1-4. Электрическая схема по рис. 1-3.

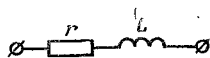


Рис. 1-5. Эквивалентная схема катушки сопротивления.

Для цепей на рис. 1-5 и 1-6 соответственно используются формулы:

$$\tau = L/r \quad \text{и} \quad \tau = L/r - Cr. \quad (1-18)$$

Из формул (1-18) следует, что у катушек с относительно малым сопротивлением постоянная времени определяется преимущественно индуктивностью, а у катушек с большим сопротивлением — емкостью.

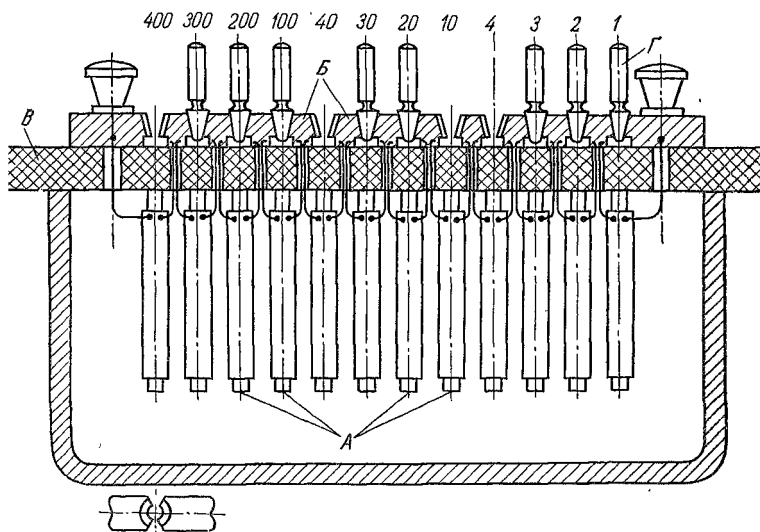


Рис. 1-7. Устройство штепсельного магазина сопротивлений.

Для получения катушек с малой постоянной времени применяется ряд намоток, среди которых: а) бифилярная (рис. 1-3), обеспечивающая компенсацию намагничивающих сил (н. с.) двух смежных витков, вследствие чего индуктивность катушки становится ничтожной; б) однослойная намотка на тонкую изоляционную пластину, обеспечивающая получение малой индуктивности.

В зависимости от способа включения катушек магазины сопротивлений делят на штепсельные и рычажные.

В штапсельном магазине резисторов (рис. 1-7) концы каждой катушки *A* соединяются с двумя латунными пластинами *B*, укрепленными на панели *B* из изоляционного материала. Выключение катушки производится коротким замыканием ее при помощи штепселя *Г*, включение — вы-

ниманием штепселя. Конической заточкой гнезд и штепселей достигается уменьшение контактных сопротивлений.

Катушки в магазине соединяются группами, величины сопротивлений катушек в группе находятся в отношении 1 : 2 : 3 : 4 или 1 : 2 : 2 : 5. Каждая следующая группа из четырех катушек имеет сопротивления в 10 раз больше предыдущей (рис. 1-7). При таком наборе требуется наименьшее количество катушек для получения заданного сопротивления. Например, магазин резисторов, изображенный на рис. 1-7, позволяет иметь любое сопротивление от 1 до 1 110 Ом ступенями по 1 Ом. Резисторы нельзя нагружать током выше тех значений, которые указываются на них, во избежание их нагревания.

Значение включенного сопротивления в магазине принимается равным сумме номинальных значений сопротивлений включенных резисторов. Действительное значение включенного сопротивления будет больше на сумму контактных сопротивлений всех вставленных штепселей. Рассмотренные магазины резисторов имеют большое число штепселей, что является их недостатком.

Контактное сопротивление при хорошем состоянии поверхности и достаточном нажатии равно примерно  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом; при загрязнении поверхности и слабом нажатии сопротивление контакта может увеличиться в сотни раз, вследствие этого могут возникнуть значительные погрешности.

Декадный штепсельный магазин резисторов состоит из двух (рис. 1-8), трех или большего числа декад. Каждая декада имеет девять одинаковых катушек и один штепсель для их переключения. Катушки каждой следующей декады имеют сопротивление, в 10 раз большее предыдущей. Число катушек в декадном магазине примерно в 2,5 раза больше, чем в равномерном (рис. 1-7), что неэкономично.

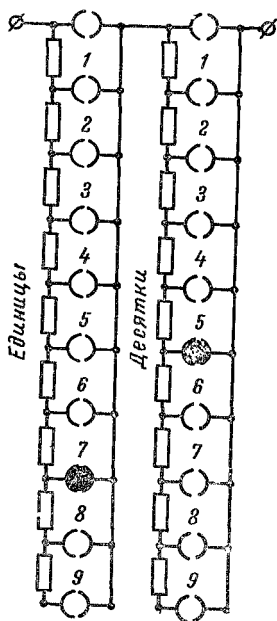


Рис. 1-8. Схема декадного штепсельного магазина сопротивлений.

В рычажном декадном магазине резисторов (рис. 1-9) изменение сопротивлений производится при помощи рычага, без разрыва цепи, чем он выгодно отличается от декадного штепсельного магазина резисторов.

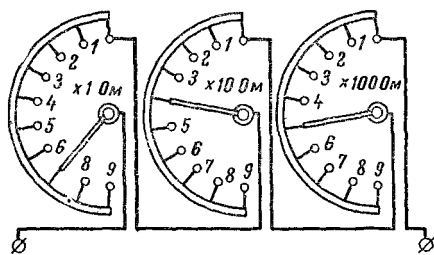


Рис. 1-9. Схема декадного рычажного магазина сопротивлений.

На рис. 1-10 показана схема одной пятикатушечной декады магазина резисторов типа Р-33 отечественного производства. Магазины резисторов и образцовые катушки изготавливаются для работы в цепях постоянного тока или безреактивные для работы в цепях переменного тока. Например, отечественная промышленность выпускает безреактивные катушки типа ОКСБ и безреактивные магазины резисторов штепсельные типа МСШБ, Р-58 и рычажные СРРБ Р-517.

#### г) Меры индуктивности и взаимной индуктивности

Меры индуктивности с постоянным значением — это катушки с постоянным значением индуктивности.

Образцовые катушки индуктивности (рис. 1-11) представляют собой пластмассовый или фарфоровый каркас с наложенной на него обмоткой из медной изолированной проволоки, концы которой укрепляются на зажимах. Использование каркаса из немагнитного материала обеспечивает независимость индуктивности от тока в катушке.

Добротность катушки  $Q = \omega L/r$  увеличивают, уменьшая ее активное сопротивление  $r$ .

Образцовые катушки изготавливаются на следующие номинальные значения индуктивности: 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1 Г.

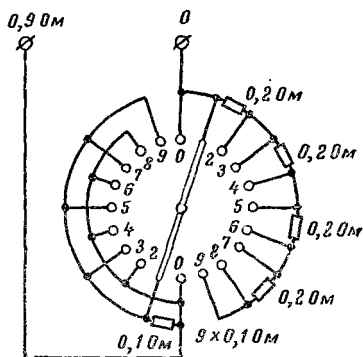


Рис. 1-10. Схема пятикатушечной декады.



Образцовая катушка с переменной индуктивностью — вариометр состоит из двух частей — неподвижной и подвижной, могущей поворачиваться на угол около  $180^\circ$ . Индуктивность вариометра зависит от положения подвижной части.

Магазин индуктивностей состоит из набора катушек, а иногда, кроме того, и из вариометра. Например, магазин типа Р-546 имеет декады катушек  $10 \times 0,1$ ;  $10 \times 1$  и  $10 \times 10$  мГ и вариометр  $0 - 0,1$  мГ. Погрешность этого магазина индуктивностей равна  $\pm(0,3 \div 0,5)\%$ .

Катушки взаимной индуктивности выполняются аналогично катушкам индуктивности, но имеют две обмотки.

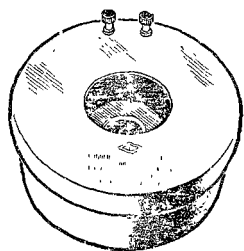


Рис. 1-11. Образцовая катушка индуктивности.

#### д) Меры емкости

Меры емкости — это образцовые конденсаторы с известной постоянной или переменной емкостью. Емкость конденсатора должна возможно меньше изменяться в за-

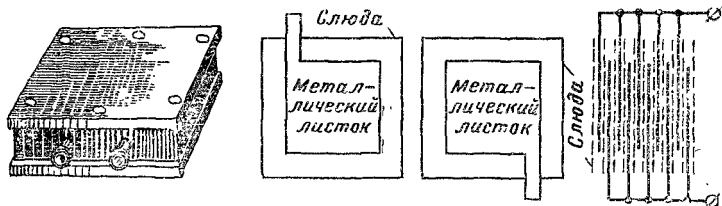


Рис. 1-12. Образцовый конденсатор со слюдяной изоляцией.

висимости от времени, температуры, частоты и других факторов. Конденсатор должен обладать малыми диэлектрическими потерями и большим сопротивлением изоляции. В качестве образцовых используются воздушные и слюдяные конденсаторы.

Воздушные конденсаторы выполняются с плоскими или цилиндрическими электродами, они имеют малую емкость от  $0,001$  мкФ и практически не обладают диэлектрическими потерями.

Слюдяные конденсаторы (рис. 1-12) состоят из ряда металлических пластин, изолированных слюдяными про-

кладками. Четные пластины соединены с одним, а нечетные с другим зажимом конденсатора. Тангенс угла потерь слюдяных конденсаторов порядка  $10^{-4}$ , погрешность их составляет  $\pm(0,01 \div 0,5)\%$ .

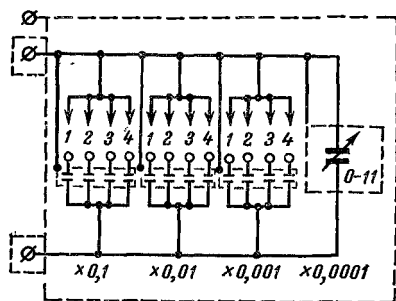


Рис. 1-13. Схема соединений магазина емкостью типа Р-513.

На рис. 1-13 дана схема соединения магазина конденсаторов типа Р-513 киевского завода «Точэлектроприбор». Кроме трех групп конденсаторов, в магазине имеется конденсатор переменной емкости ( $C = 0 \div 0,011$  мкФ), т. е. номинальная емкость магазина составляет 1,111 мкФ.

Пунктиром на схеме показаны экраны для защиты от влияния внешних полей. Эти магазины могут применяться при частоте от 40 Гц до 10 кГц. Погрешность их равна  $\pm 0,5\%$ .

#### 1-4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

##### а) Классификация

Два основных вида измерительных приборов — приборы непосредственной оценки и приборы сравнения — соответствуют двум основным методам измерений, носящим те же названия.

Прибором непосредственной оценки (показывающим прибором) называется измерительный прибор, допускающий определение значения измеряемой величины по отсчетному устройству, например шкале и стрелке.

Прибором сравнения называется измерительный прибор, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с мерой или с величиной, значение которой известно, например мост для измерения сопротивлений.

Приборы непосредственной оценки и приборы сравнения по системе отсчета показаний делят на приборы с непрерывным отсчетом, например стрелочные приборы, и приборы с дискретным отсчетом — цифровые

приборы, показания которых выражаются в цифровой форме.











В технике чаще применяются приборы непосредственной оценки как более простые, дешевые и требующие мало времени для производства измерения.

Приборы сравнения используются для более точных измерений.

В табл. 1-3 дано деление электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины.







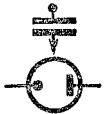


Таблица 1-3










**Деление электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины**

Род измеряемой прибором величины	Название прибора	Условное обозначение прибора
Сила тока	Амперметр	
Напряжение	Вольтметр	
Мощность	Ваттметр	
Энергия	Счетчик киловатт-часов	
Количество электричества	Счетчик ампер-часов	
Сдвиг фаз	Фазометр	
Частота	Частотомер	
Сопротивление	Омметр	
Индуктивность	Генриметр	
Емкость	Фарадометр	

## Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы и вспомогательные части (ГОСТ 1845-59)

Приборы и вспомогательные части		Условные обозначения	
		С механическим противодействующим моментом	Логометры (без механического противодействующего момента)
<i>1. Системы приборов</i>			
Магнитоэлектрическая	С подвижной рамкой		
	С подвижным магнитом		
Электромагнитная	Неполяризованная		
	Поляризованная		—
Электродинамическая	Электродинамическая		
	Ферродинамическая		
Индукционная	Индукционная		
	Магнитоиндукционная		—
Тепловая	С нагреваемой проволокой		—
	Биметаллическая		—
Электростатическая	—		—
Вибрационная	—		—

Приборы и вспомогательные части	Условные обозначения
<i>2. Дополнительные обозначения по виду преобразователя</i>	
Термопреобразователь изолированный	
Термопреобразователь неизолированный	
Выпрямитель полупроводниковый	
Электронный преобразователь	
<i>3. Примеры применения обозначения</i>	
Термоэлектрический прибор (с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим механизмом)	
Выпрямительный прибор (с полупроводниковым выпрямителем и измерительным механизмом с подвижным магнитом)	
Электронный прибор с электростатическим измерительным механизмом	
<i>4. Дополнительные обозначения по защите от полей</i>	
Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)	
Защита от внешних электрических полей (I категория защищенности)	

Приборы и вспомогательные части	Условные обозначения
Магнитоэлектрический прибор (I категория защиты от магнитных полей)	
Электростатический прибор (I категория защиты от электрических полей)	
5. Обозначения рода тока	
Постоянный ток	—
Переменный ток	~
Трехфазный ток	≍
6. Обозначения класса точности, положения прибора и пр.	
Класс точности при нормировании погрешности в процентах диапазона измерения, например 1,5	1,5
Класс точности при нормировании погрешности в процентах длины шкалы, например 1,5	
Горизонтальное положение шкалы	
Вертикальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы под углом к горизонту, например 60°	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ	
Генераторный зажим	*
Зажим, соединенный с корпусом	
Зажим для заземления	

Кроме того, электроизмерительные приборы подразделяют по следующим признакам: по роду тока; по принципу действия в зависимости от системы (табл. 1-4); по степени точности (§ 1-4, ж); по степени защищенности от внешних полей; по условиям эксплуатации; по устойчивости к механическим воздействиям; по характеру применения; по способу монтирования; по форме корпуса; по защищенности; по габаритным размерам.

По роду тока приборы делят на приборы постоянного тока, приборы переменного тока и приборы постоянного и переменного тока.

По степени защищенности от внешних полей приборы делят на I и II категории.

По условиям эксплуатации приборы делят на группы:

Группа А — приборы для работы в сухих отапливаемых помещениях при температуре окружающей среды 10—35 °С и при влажности до 80% при 30 °С.

Группа Б — приборы для работы в закрытых неотапливаемых помещениях при температуре окружающей среды от —30 до +40 °С и влажности до 90% при +30 °С.

Группа В — приборы для работы в полевых и морских условиях. Группа В<sub>1</sub> — при температуре от —40 до +50 °С и группа В<sub>2</sub> — при температуре от —50 до +60 °С и влажности до 95% при 35 °С.

Приборы, предназначенные для работы в условиях тропического климата, имеют обозначение типа с буквой Т.

По устойчивости к механическим воздействиям различают приборы обыкновенные, тряскопрочные, вибропрочные, ударопрочные, тряскоустойчивые и виброустойчивые. Тряскопрочными, вибропрочными и ударопрочными считаются приборы, способные выполнять свои функции во время тряски или вибраций.

По характеру применения различают приборы стационарные (рис. 1-14) и переносные (рис. 1-15).

По способу монтирования приборы делят на приборы утопленного и выступающего монтажа.

По защищенности корпусами приборы делят на обыкновенные, пылезащищенные, брызгозащищенные, водозащищенные, газозащищенные, герметические и взрывобезопасные.

По габаритным размерам различают приборы миниатюрные (до 50 мм), малогабаритные (50—100 мм), средние (100—200 мм), большие (свыше 200 мм).

Общие технические требования на электроизмерительные приборы даны в ГОСТ 1845-59.

Заводские обозначения электроизмерительных приборов состоят из трех элементов: 1) буквы, обозначающей систему прибора; 2) одной или двух цифр, обозначающих завод-изготовитель; 3) цифры, указывающей номер конструктивной разработки. Различным системам присвоены

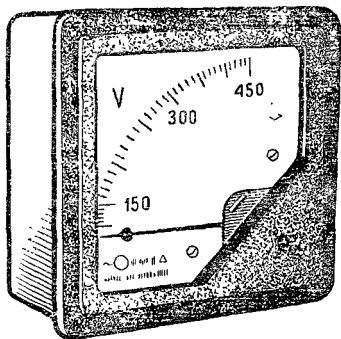


Рис. 1-14. Стационарный прибор с прямоугольным утолщенным стандартным корпусом.

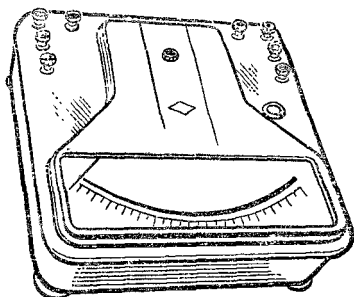


Рис. 1-15. Переносный многопредельный прибор типа М-502.

следующие буквенные обозначения: В — вибрационная; Д — электродинамическая и ферродинамическая; И — индукционная; М — магнитоэлектрическая; С — электростатическая; Т — тепловая и термоэлектрическая; Ф — электронная и транзисторная; Ц — выпрямительная; Э — электромагнитная; Н — самопишущие приборы; Р — приборы сопротивления и шунты.

Цифры, соответствующие некоторым из заводов: 1 — ленинградский завод «Вибратор»; 3 — Краснодарский завод электроизмерительных приборов; 5 — киевский завод «Точэлектроприбор»; 42 — Чебоксарский завод электроизмерительных приборов и т. п.

### б) Схема работы прибора

Большинство электроизмерительных приборов непосредственной оценки состоит из двух основных частей: измерительной цепи и измерительного механизма.

Преобразовательным элементом измерительного прибора называется элемент прибора, в ко-



тором происходит одно из ряда преобразований измеряемой величины.

Измерительная цепь прибора — это совокупность всех преобразовательных элементов прибора, обеспечивающая выполнение всех преобразований сигнала измерительной информации (измеряемой величины).

Измерительный механизм — это часть конструкции измерительного прибора, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение.

Измерительная цепь или один из ее преобразовательных элементов, находясь под воздействием измеряемой величины  $x$ , вырабатывает сигнал измерительной информации, вспомогательную величину  $y$ , однозначно зависящий от измеряемой величины, т. е.

$$y = F(x).$$

Воздействие сигнала ( $y$ ) на измерительный механизм вызывает взаимодействие его элементов и перемещение его подвижной части.

В большинстве показывающих приборов подвижная часть поворачивается на угол  $\alpha$ , зависящий от сигнала  $y$ , а следовательно, и от измеряемой величины

$$\alpha = \varphi(y) = \varphi[F(x)] = f(x). \quad (1-19)$$

По углу поворота  $\alpha$  и определяется измеряемая величина  $x$ .

Измеряемая величина сообщает подвижной части измерителя некоторое количество энергии, так что на нее будет действовать вращающий момент  $M$ . Под действием этого момента подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока он не уравновесится противодействующим моментом  $M_{\text{пр}}$ , создаваемым обычно пружинами прибора и зависящим от угла поворота подвижной части.

На рис. 1-6 в качестве примера показан измерительный механизм электромагнитной системы. Ток, проходя по неподвижной катушке, намагничивает сердечник  $\mathcal{E}$  и втягивает его внутрь катушки, вызывая поворот подвижной части.

Несмотря на разнообразие измерительных механизмов, которые рассмотрены в гл. 2, познакомимся в общих чертах с устройством их подвижной части.

У большинства приборов измерительный механизм имеет ось 1 (рис. 1-16), заточенные концы которой (керны) располагаются в опорах — подпятниках. На оси укрепляется указательная стрелка — указатель 2, один конец спиральной пружины 4 и рабочий элемент 3, который в данном случае представляет собой стальной сердечник, а у других механизмов — катушку, диск и т. д. Второй конец пружины крепится на поводке корректора 5, который дает возможность перед измерением установить стрелку прибора на нулевом делении шкалы. Грузики 6 предназначены для уравнивания подвижной части

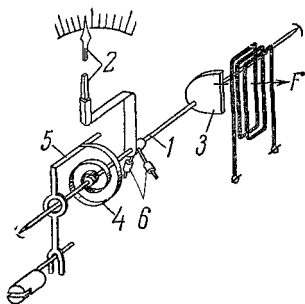


Рис. 1-16. Схема устройства электромагнитного измерительного механизма.

относительно оси вращения, с тем чтобы центр тяжести ее совпадал с осью.

В зависимости от принципа действия измерительного механизма (прибора), т. е. физического принципа, положенного в основу получения вращающего момента, измерительные механизмы (приборы) делят на следующие системы: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, индукционная, тепловая, электростатическая и вибрационная (табл. 1-4). Например, в магнитоэлектрической

системе вращающий момент создается взаимодействием магнитного поля постоянного магнита и электрического тока; в электромагнитной системе момент создается взаимодействием магнитного поля, созданного током и сердечником из ферромагнитного материала; в тепловой системе используется тепловое действие тока. Каждой системе измерителя присущи определенные свойства, а следовательно, определенная область применения.

Некоторые измерительные механизмы применяются совместно с измерительными преобразователями, например с термопреобразователем, преобразующим переменный ток в постоянный; с выпрямительным полупроводниковым преобразователем; с электронным преобразователем и др. Устройство, состоящее из измерительного механизма и преобразователя, получает существенно новые, отличные от измерителя свойства и новые области применения, вследствие чего ГОСТ 1845-59 некоторым

из таких устройств присвоил названия систем, например термоэлектрической — состоящей из магнитоэлектрического измерителя и термопреобразователя; выпрямительной — состоящей из магнитоэлектрического измерителя и полупроводникового выпрямительного преобразователя; электронпой — состоящей из магнитоэлектрического или электростатического измерителя и электронного преобразователя (табл. 1-4).

в) Установившееся положение подвижной части

Противодействующий момент у большинства стрелочных приборов создается пружинами, а при малых вращающих моментах — растяжками или подвесом, на которых крепится подвижная часть (рис. 1-17, а и б). Применение растяжек позволяет повысить чувствительность и уменьшить мощность потерь прибора, устранить погрешность от трения.

Противодействующий момент, созданный пружинами, растяжками или подвесом, пропорционален углу закручивания или, что то же, углу поворота подвижной части

$$M_{\text{пр}} = D\alpha, \quad (1-20)$$

где  $D = M_{\text{пр}}/\alpha$  — удельный противодействующий момент, постоянный для данного устройства.

Вращающий момент зависит от измеряемой величины, т. е.  $M = f(x)$ , а положение равновесия подвижной части наступает при равенстве моментов  $M = M_{\text{пр}}$ . Таким образом,  $D\alpha = f_1(x)$ , откуда

$$\alpha = \frac{1}{D} f_1(x) = f(x), \quad (1-21)$$

т. е. угол поворота подвижной части зависит от измеряемой величины.

В простейшем случае, например для приборов магнитоэлектрической системы, вращающий момент, как правило, является линейной функцией измеряемой величины, т. е.

$$M = f_1(x) = k_1x. \quad (1-22)$$

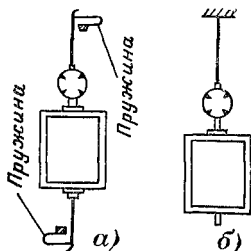


Рис. 1-17. Крепление подвижной части.  
а — на растяжках; б — на подвесе.

При этом

$$\alpha = \frac{k_1}{D} x = S_x x \quad (1-23)$$

и угол поворота подвижной части пропорционален измеряемой величине.

Величина

$$S = \alpha/x \quad (1-24)$$

называется чувствительностью прибора. Она численно равна угловому (или линейному) перемещению указателя, соответствующему единице измеряемой величины. Например, чувствительность амперметра к току  $S_I$  равна 20 делениям на ампер.

Величина

$$C_x = x/\alpha = 1/S_x \quad (1-25)$$

называется постоянной прибора. Она численно равна измеряемой величине, соответствующей перемещению указателя на одно деление шкалы прибора. Таким образом, определение измеряемой величины по прибору производится путем умножения постоянной  $C_x$  на угол поворота подвижной части или, как принято говорить, на отсчет, т. е. число, прочитанное у отметки шкалы, которым определяется угол поворота.

Таким образом,

$$x = C_x \alpha = C_x N, \quad (1-26)$$

где  $N$  — отсчет по шкале.

### г) Устанавливающий момент и момент трения

Точка пересечения  $A$  графиков вращающего и противодействующего моментов (рис. 1-18) определяет положение равновесия подвижной части.

Если вывести подвижную часть из положения равновесия, повернув ее на угол  $\pm \Delta\alpha$  (рис. 1-18), то возникает устанавливающий момент, равный разности вращающего и противодействующего моментов:

$$M_y = M - M_{пр}, \quad (1-27)$$

который стремится вернуть подвижную часть в положение равновесия.

Если подвижная часть повернута от положения равновесия в сторону нарастающих значений, т. е.  $\Delta\alpha > 0$

(рис. 1-18), то  $M_{пр} > M$  и устанавливающий момент  $M_y = M - M_{пр} < 0$  направлен противоположно вращающему.

Если подвижная часть повернута от положения равновесия в сторону убывающих значений, т. е.  $\Delta\alpha < 0$ , то  $M_{пр} < M$  и устанавливающий момент  $M_y = M - M_{пр} > 0$ . В этом случае устанавливающий момент совпадает с вращающим.

Большой устанавливающий момент при одном и том же значении  $\Delta\alpha$  обеспечивает более быструю и надежную установку подвижной части в положение равновесия.

Для сравнения между собой различных приборов пользуются относительным устанавливающим моментом:

$$M_y = M_y / \Delta\alpha, \quad (1-28)$$

который называется удельным устанавливающим моментом.

Подвижная часть большинства приборов крепится на оси, расположенной в подпятниках. Для уменьшения трения подпятники выполняются из камня (агат, рубин) или бронзы и хорошо полируются, так же как и керны. Подпятник крепится в опорном винте (рис. 1-19). При движении подвижной части в опорах возникает момент трения  $M_{тр}$ , направленный в сторону, противоположную ее движению. По опытным данным момент трения приблизительно пропорционален массе подвижной части  $G$  в степени 1,5, т. е.

$$M_{тр} = k_{тр} G^{1,5}, \quad (1-29)$$

где  $k_{тр}$  — коэффициент пропорциональности.

При измерении величины  $x_1$  и отсутствии трения подвижная часть повернется на угол  $\alpha_1$ , при котором  $M_1 = M_{пр} = D\alpha_1$ , откуда

$$\alpha_1 = M_1 / D. \quad (1-30)$$

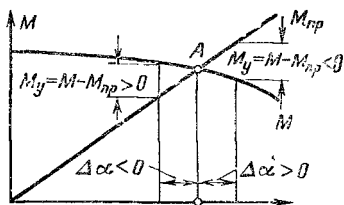


Рис. 1-18. Графики вращающего и противодействующего моментов в зависимости от угла поворота подвижной части.

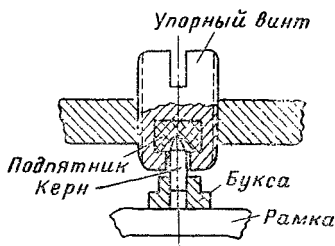


Рис. 1-19. Подпятник измерительного механизма.

Сказанное иллюстрируется рис. 1-20, на котором даны графики вращающего и противодействующего моментов. При наличии трения в опорах и изменении измеряемой величины от 0 до  $x_1$  или от номинального значения до  $x_1$  подвижная часть не дойдет до положения  $\alpha_1$  на угол  $\Delta\alpha = \alpha_{\text{тр}}$ , остановившись в положении  $\alpha'_1$  или  $\alpha''_1$ , при котором  $M_y = M_{\text{тр}}$ .

При малых моменте трения и угле трения устанавливающий момент  $M_y = M'_y \alpha_{\text{тр}}$ , откуда

$$\alpha_{\text{тр}} = M_y / M'_y = M_{\text{тр}} / M'_y, \quad (1-31)$$

а приведенная погрешность от трения

$$\gamma_{\text{тр}} = \alpha_{\text{тр}} / \alpha_n = M_{\text{тр}} / (M'_y \alpha_n) = k_{\text{тр}} G^{1,5} / (M'_y \alpha_n), \quad (1-32)$$

где  $\alpha_n$  — номинальный угол поворота подвижной части прибора.

Погрешность от трения зависит от момента трения, а следовательно, от массы подвижной части, от материала и качества обработки подпятников и кернов, от состояния трущихся поверхностей, а также от удельного устанавливающего момента.

Погрешность от трения является одной из наиболее существенных погрешностей прибора.

Механические качества прибора, обусловленные его конструкцией, принято характеризовать практическим коэффициентом добротности

$$A_d = 10 M_{90^\circ} / G^{1,5}, \quad (1-33)$$

где  $M_{90^\circ}$  — момент, созданный противодействующими пружинами при закручивании их на угол  $90^\circ$ , гс·см;

$G$  — масса подвижной части, г;

10 — множитель, введен для того, чтобы получить значения для  $A_d$ , близкие к единице.

Для приборов различных систем  $A_d$  имеет значения в пределах 0,1—10.

#### д) Отсчетное устройство

Шкалой прибора называется часть отсчетного устройства, состоящая из совокупности отметок и поставленных у некоторых из них чисел отсчета, соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины.

Технические приборы имеют обычную (незеркальную) шкалу и копьевидную стрелку (рис. 1-16).

Приборы класса точности 0,5 и выше снабжаются пожевидной стрелкой и зеркальной шкалой (рис. 1-21). У такой шкалы делается дугообразный вырез, с нижней стороны которого крепится зеркало. Отсчет по такой шкале производится при том положении глаза, при котором стрелка закрывает свое изображение в зеркале.

Шкала прибора называется равномерной или пропорциональной (рис. 1-21), если расстояния между двумя любыми смежными отметками ее равны между собой, в противном случае она называется неравномерной (рис. 1-14).

В приборах с малым вращающим моментом применяется световой указатель (рис. 1-22, а), расположенный в его корпусе. Луч от лампы 1, пройдя оптическую систему 2 и диафрагму 3, после отражения в зеркале 4 подвижной части попадает на шкалу 5, давая изображение светлого пятна, на фоне которого резко вырисовывается тень стрелки, укрепленной в отверстии диафрагмы. Поворот подвижной части вызывает перемещение по шкале «теневого» стрелки.

В некоторых приборах на шкалу проектируется теневая линия после многократного отражения луча, что эквивалентно удлинению стрелки до 1—1,5 м. Оптическая схема одного из таких приборов (типа М95) дана на рис. 1-22, б. Лучи света от лампы 1 проходят конденсатор 2, диафрагму 3, линзы 6 и 8, отражаются от зеркал 4 и 5 и линзы 6, затем от зеркала подвижной части 7, далее после отражения от зеркал 9 и 10 попадают на шкалу 11.

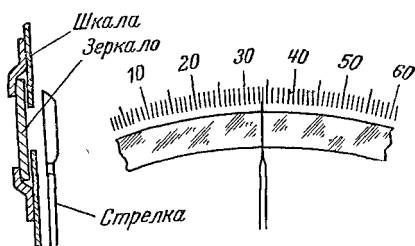


Рис. 1-21. Зеркальная шкала и кожевидная стрелка.

За последние годы получили некоторое применение приборы с цифровым отсчетом — цифровые приборы, в которых под действием измеряемой величины при ее

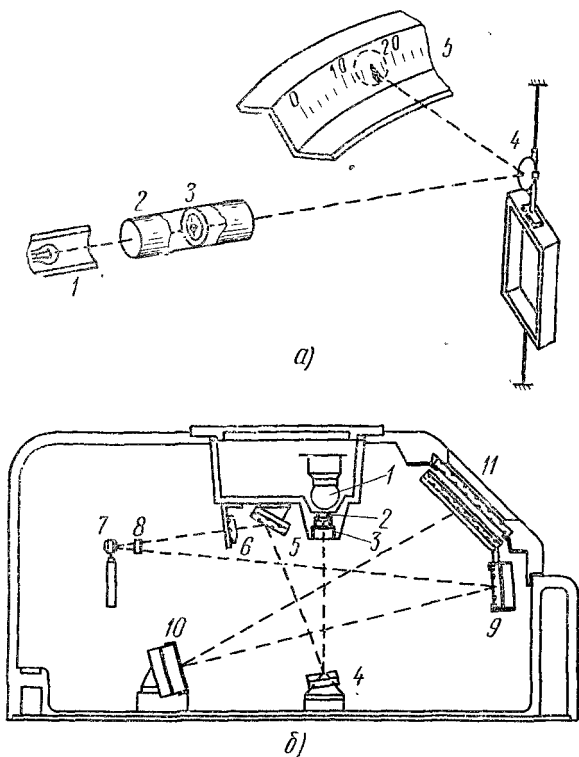


Рис. 1-22. Световой указатель с однократным отражением луча (а) и оптическое устройство с многократным отражением луча (б).

изменении автоматически вырабатываются сигналы измерительной информации и показания представляются в цифровой форме.

#### е) Успокоение

Временем успокоения прибора называется промежуток времени от момента включения прибора до момента, при котором амплитуда колебания стрелки составит не более 1% длины шкалы. Время успокоения должно быть ма-



лым. Согласно ГОСТ это время должно быть не более 4 с для приборов всех классов точности.

Все измерительные приборы снабжаются успокоителями — приспособлениями для успокоения колебаний подвижной части.

Применяются воздушные и магнитоиндукционные успокоители (рис. 1-23 и 1-24).

Воздушный успокоитель (рис. 1-23) состоит из закрытой камеры, внутри которой может перемещаться крыло, укрепленное на оси прибора. При вращении подвижной части в камере по одну сторону крыла получается сжатие, по другую — разрежение воз-

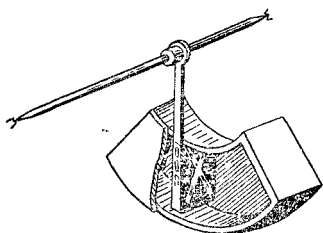
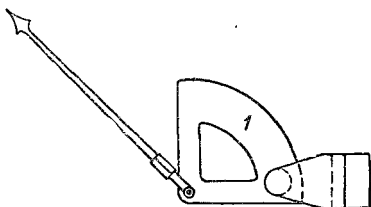


Рис. 1-23. Воздушный успокоитель.

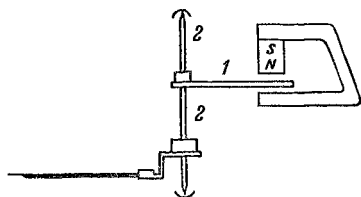


Рис. 1-24. Магнитоиндукционный успокоитель.

духа. Разность давлений, направленная против движения крыла, оказывает тормозящее действие, успокаивающее колебания подвижной части.

Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 1-24) состоит из алюминиевого листочка 1, укрепленного на оси прибора 2, расположенного в поле магнита *NS*. При движении листочка в магнитном поле в нем индуцируются вихревые токи, взаимодействие которых с тем же магнитным полем создает тормозящее действие, уменьшая время успокоения.

### ж) Погрешности приборов

Показание любого измерительного прибора вследствие несовершенства измерительного механизма и непостоянства параметров измерительной цепи всегда несколько

отличается от действительного значения измеряемой величины, иначе говоря, всякий прибор имеет погрешность.

Погрешности приборов делятся на две группы:

1. **Основная погрешность прибора** — погрешность, которую имеет прибор при нормальных условиях работы (§ 1-4, в). Основная погрешность вызывается рядом причин: трением; опрокидыванием; неуравновешенностью подвижной части; неправильной градуировкой и установкой шкалы; остаточной деформацией пружины и т. п.

Согласно ГОСТ 1845-59 приборы непосредственной оценки делят на классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4, которые указываются на шкалах измерительных приборов. Цифра класса точности обозначает основную, наибольшую допустимую приведенную погрешность (1-5).

Степень устойчивости показаний прибора при одних и тех же условиях измерения одной и той же величины характеризуется вариацией показаний прибора.

**Вариация показаний прибора** — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Она определяется при плавном подходе стрелки к испытуемой отметке шкалы один раз при движении ее от начальной, а второй раз от конечной отметок шкалы. Вариация показаний приближенно равна удвоенной погрешности от трения, так как причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части.

2. **Дополнительная погрешность прибора** — погрешность, вызванная отклонением условий работы прибора от его нормальных условий. Различают дополнительные погрешности от изменения температуры, неправильной установки прибора, влияния внешних магнитных и электрических полей, изменения частоты и т. п.

Дополнительные погрешности также нормируются ГОСТ 1845-59.

Приведенные допустимые дополнительные погрешности, или, что то же, изменения показаний прибора, вызванные отклонением температуры окружающего воздуха на  $\pm 10$  °С от нормальной в пределах рабочих температур (§ 1-4, а), для приборов группы А установлены равными основной погрешности соответствующего класса точности. Например, для прибора группы А, класса точ-

пости 1,5 приведенная допустимая дополнительная погрешность от температуры, так же как и основная, составляет  $\pm 1,5\%$ .

Для приборов групп Б и В устаковлены меньшие, чем для группы А, приведенные допустимые погрешности от температуры. Так, например, для приборов класса точности 0,5 группы Б допустимая погрешность от температуры ограничена  $\pm 0,4\%$ , а для приборов группы В  $\pm 0,3\%$ .

Приведенные допустимые погрешности приборов групп А, Б и В, вызванные определенным отклонением прибора от рабочего нормального положения и отклонением частоты на  $\pm 10\%$  от номинальной, установлены равными основной погрешности.

Внешние магнитные и электрические поля, накладываясь на собственные поля приборов, оказывают влияние на показания приборов. Это влияние увеличивается с усилением внешнего поля и уменьшением собственного поля прибора. Влияние внешних полей ослабляется применением экранов.

Изменение показаний приборов постоянного тока при самом неблагоприятном направлении поля напряженностью 400 А/м не должно превышать  $\pm 0,5\%$  для приборов категории I и 1,0% для приборов категории II классов точности 0,1; 0,2 и 0,5 и соответственно  $\pm 1,0$  и  $\pm 2,5\%$  для классов точности 1 и 1,5.

Такие же значения изменений показаний допускаются для приборов переменного тока с частотой до 1 кГц под влиянием однородного магнитного поля напряженностью 400 А/м, изменяющегося с той же частотой, что и частота измеряемой величины, при самых неблагоприятных фазе и направлении поля.

Приборы переменного тока с магнитоэлектрическим измерительным механизмом должны удовлетворять вышеуказанным требованиям при испытании в переменном и постоянном магнитных полях.

При монтаже приборов на щите из ферромагнитного материала толщиной 3 мм и установке переносных приборов на ферромагнитном основании толщиной 3 мм изменение их показаний не должно превышать  $\pm 0,25\%$  для приборов категории I и  $\pm 0,5\%$  для приборов категории II классов точности 0,1; 0,2; 0,5 и соответственно  $\pm 0,5$  и  $\pm 1,0\%$  для приборов более низких классов точности. Из изложенного следует, что в общем случае точность

измерения величины измерительным прибором определяется суммой двух погрешностей — основной и дополнительной.

### а) Устойчивость к перегрузкам

Различают два вида перегрузки: 1) термическую — длительную перегрузку прибора током (превышающим номинальный), при которой происходит нагрев отдельных частей прибора выше допустимых значений; 2) динамическую — импульсную перегрузку током, при которой подвижная часть отбрасывается в предельное положение и испытывает механический удар, при котором могут повредиться подвижная часть, подпятники и т. п. В ГОСТ 1845-59 предъявлены к приборам требования в отношении устойчивости приборов к тому и другому виду перегрузки.

### и) Прочность изоляции

Изоляция измерительных приборов и вспомогательных частей должна обладать достаточной электрической

Таблица 1-5

Нормы для испытания изоляции приборов

Номинальное напряжение прибора или номинальное напряжение сети	Действующее значение испытательного напряжения, кВ	
	При номинальной влажности	При повышенной влажности (приборы группы В)
До 40 В . . . . .	0,5	0,5
Выше 40 до 650 В . . . . .	2,0	1,5
Выше 650 до 1 000 В . . . . .	3,0	2,0
Выше 1 до 2 кВ . . . . .	5,0	3,5
Для приборов, предназначенных для включения через измерительные транс- форматоры . . . . .	2,0	1,5 кВ

прочностью. Согласно ГОСТ 1845-59 изоляция должна выдерживать в течение 1 мин указанное табл. 1-5 напряжение переменного тока частотой 50 Гц.

### к) Мощность потерь

Работа измерительного прибора связана с расходом электрической энергии. Большая часть ее идет на нагревание его электрической цепи, меньшая — на вихревые токи и перемагничивание стали. В большинстве случаев эта мощность потерь мала с точки зрения экономии электроэнергии. Но в отношении повышения температуры отдельных частей прибора и вызванных этим обстоятельством погрешностей всегда следует иметь прибор с меньшей мощностью потерь. Кроме того, мощность потерь прибора и его параметры должны быть такими, чтобы включение прибора не вносило изменений в режим работы цепи, в которой производится измерение, и тем самым не являлось источником погрешностей. Последнее особенно важно при измерении в цепях с малой мощностью.

В табл. 1-6 даны примерные мощности потерь некоторых приборов.

Таблица 1-6

Мощности потерь электроизмерительных приборов

Приборы	Мощность потерь, Вт (В·А)	
	амперметров и последовательных цепей ваттметров при токе 5 А	вольтметров и параллельных цепей при напряжении 100 В
Амперметры:		
магнитоэлектрические . . . . .	0,2—0,5	—
выпрямительные других систем . . .	1—10	—
Вольтметры:		
магнитоэлектрические . . . . .	—	0,1—1
выпрямительные других систем . . .	—	2—10
Ваттметры . . . . .	1—5	3—6
Фазометры . . . . .	3—4	5—8
Счетчики . . . . .	1—2	1—4

### л) Надежность

При массовом производстве и применении средств измерений существенное значение имеет их надежность.

Под надежностью понимают свойство изделия — средства измерения, его узлов, блоков или деталей — выполнять

функции, для которых они предназначены при определенных условиях эксплуатации и которые определяются стандартом или техническими условиями.

Если значение одного или нескольких параметров изделия выходит за пределы, установленные ГОСТ или техническими условиями, то говорят, что имеет место отказ. Таким образом, после отказа изделие или продолжает функционировать с худшим качеством или совсем перестает выполнять свои функции.

Изделие, позволяющее обнаружить отказ и устранить его, обладает восстановиваемостью, таким свойством обладает, в частности, большинство средств измерения.

Безотказность — это свойство изделия непрерывно функционировать в определенных условиях в течение определенного времени. Оно устанавливается ГОСТ или техническими условиями.

Долговечность — свойство изделия функционировать в определенных условиях продолжительное время, характеризуется периодом времени практического использования изделия от начала эксплуатации до момента, с которого эксплуатация его делается технически или экономически нецелесообразной. Так, например, электрические счетчики имеют долговечность около 20 лет.

Гарантийным сроком называется период времени, в течение которого завод-изготовитель гарантирует исправную работу изделия при соблюдении правил эксплуатации прибора.

Количественные показатели надежности в большинстве случаев определяются путем прогноза в период, когда изделие ставится на серийное производство. При этом незначительная часть изделий отбирается для испытаний на надежность. По результатам этих испытаний определяют показатели надежности всех изделий данного типа. К ним относятся максимальная интенсивность отказов  $\lambda$ , минимальная вероятность безотказной работы  $P_{\min}$ , среднее время безотказной работы  $T$  и др.

Интенсивностью отказов называется отношение числа отказов приборов в единицу времени к числу исправно работающих приборов.

Обозначив число испытываемых приборов  $N$ , время испытания приборов на надежность  $t$ , число отказов  $n$  за время  $t$ , можно написать выражение интенсивности отказов:

$$\lambda = \frac{n}{(N-n)t}.$$

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в течение времени непрерывной работы  $t$  не произойдет ни одного отказа. Часто пользуются приближенным значением этого показателя, определяемым отношением числа приборов, продолжающих после определенного времени безотказно работать, к общему числу приборов:

$$P = (N-n)/N.$$

Среднее время безотказной работы  $T$  определяется как среднее арифметическое время исправной работы каждого прибора.

Обозначив время исправной работы отдельного  $i$ -го прибора  $t_i$ , можно написать выражение среднего времени безотказной работы

$$T = \sum_{i=1}^N t_i / N.$$

По найденным показателям надежности можно определить долговечность, гарантийный срок и другие качественные показатели изделия.

## Глава вторая

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИБОРОВ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

#### 2-1. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В магнитоэлектрических измерительных механизмах перемещение подвижной части вызывается силами взаимодействия поля постоянного магнита и тока, проходящего по катушке.

Измерительный механизм (рис. 2-1) состоит из неподвижной магнитной цепи и подвижной части. Магнитная цепь образуется постоянным магнитом  $NS$ , двумя стальными пластинами с укрепленными на их концах полюсными башмаками  $N'S'$  и стальным цилиндром  $I$ . В зазоре между цилиндром и полюсными башмаками образуется однородное радиальное магнитное поле.

Постоянный магнит изготовляется из высококачественных никель - алюминево - кобальтовых сталей с большой удельной магнитной энергией, что позволяет получить в зазоре магнитную индукцию  $0,2-0,3 T$ . Остальные части магнитопровода изготовляются из магнитномягких сталей.

Подвижная часть измерительного механизма включает прежде всего рамку  $2$ , состоящую из легкого прямоугольного алюминиевого каркаса с наложенной на него обмоткой из медной или алюминиевой изолированной проволоки

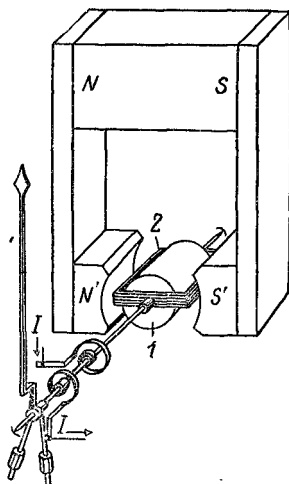


Рис. 2-1. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

( $d = 0,02 \div 0,2$  мм). На рамке крепятся две пластины с полуосями — кернами, установленными в опорах.

На одной из полуосей укрепляются внутренние концы спиральных пружин, втулка с указательной стрелкой и противовесами.

На рис. 2-2 показан путь тока: от одного зажима прибора, через спиральную пружину, обмотку рамки, вторую пружину и ко второму зажиму прибора.

В результате взаимодействия тока, проходящего по обмотке рамки, и магнитного поля в зазоре магнитопровода возникают электромагнитные силы  $F - F$  (рис. 2-2 и 2-3),

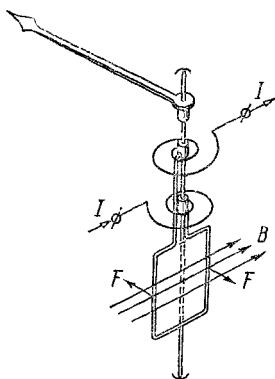


Рис. 2-2. Путь тока в измерительном механизме магнитоэлектрической системы.

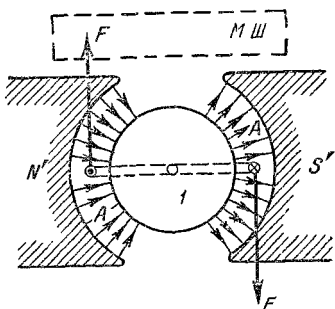


Рис. 2-3. Взаимодействие тока и магнитного поля.

действующие на рамку. Вращающий момент, созданный этой парой сил, вызывает поворот подвижной части.

Электромагнитная сила

$$F = IBlw,$$

а вращающий момент

$$M = 2F b/2 = IBlbw = IBSw, \quad (2-1)$$

где

$I$  — ток в рамке;

$B$  — магнитная индукция в зазоре;

$l$  — активная длина одной стороны рамки;

$b$  — ширина рамки;

$S = lb$  — активная площадь рамки.

Установившееся положение подвижной части определяется равенством вращающего и противодействующего



моментов, которое с учетом выражений (1-20) и (2-1) запишем:

$$IBSw = D\alpha,$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{BSw}{D} I = S_I I \quad (2-2)$$

пропорционален току, и, следовательно, прибор имеет равномерную или пропорциональную шкалу.

Ток в рамке

$$I = \frac{1}{S_I} \alpha = C_I \alpha \quad (2-3)$$

может быть определен по углу поворота подвижной части измерительного механизма и постоянной по току  $C_I$  (1-25).

Чувствительность измерительного механизма к току  $S_I = \alpha/I = BSw/D$ , постоянная по току  $C_I = 1/S_I = I/\alpha$ .

У некоторых измерительных механизмов чувствительность  $S_I$  можно регулировать путем изменения индукции  $B$  в воздушном зазоре. Это изменение производится при помощи магнитного шунта — пластины из мягкого ферромагнитного материала, расположенной около полюсных башмаков (рис. 2-3, показана пунктиром), образующей вторую параллельную ветвь в магнитопроводе.

При изменении расстояния между магнитным шунтом и полюсными башмаками изменяется магнитное сопротивление ветви шунта, следовательно, изменяется распределение магнитного потока в ветвях, изменяется в индукции  $B$  между башмаками и стальным цилиндром  $I$ .

При прохождении тока по рамке к зажимам измерительного механизма приложено напряжение

$$U = Ir = C_I \alpha r = C_U \alpha, \quad (2-4)$$

т. е. по углу поворота подвижной части можно определить напряжение на зажимах измерительного механизма, следовательно, он может быть применен для измерения напряжения. Постоянная по напряжению

$$C_U = U/\alpha = C_I r, \quad (2-5)$$

т. е. равна постоянной по току, умноженной на сопротивление рамки.

Успокоителем рассматриваемого механизма служит каркас рамки. При движении подвижной части изменяется магнитный поток, провизывающий каркас (рис. 2-4), и в нем наводится э. д. с. Эта э. д. с. вызывает в каркасе

ток  $i_T$ , взаимодействие которого с полем магнита создает тормозную силу, обеспечивающую быстрое успокоение.

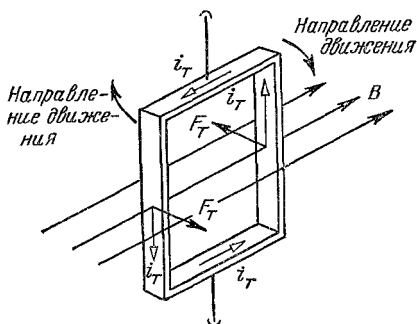


Рис. 2-4. Получение тормозного момента.

ной части при технической частоте будет определяться средним за период значением вращающего момента:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} BS w \int_0^T i dt = BS w I_{\text{ср}}. \quad (2-7)$$

Из выражения (2-7) следует, например, что при синусоидальном токе, среднее значение которого за период равно нулю, вращающий момент и угол поворота подвижной части также будут равны нулю. А нагревание подвижной части, определяемое действующим значением тока, не будет равно нулю.

Устройство измерительных механизмов магнитоэлектрической системы весьма разнообразно. Кроме рассмотренного механизма с подвижной катушкой, широкое распространение получили магнитоэлектрические механизмы с внутрирамочным магнитом (рис. 2-5). Он отличается от ранее рассмотренного тем, что неподвижный постоянный магнит 2 укреплен внутри рамки 1, активные стороны которой находятся в однородном радиальном поле между полюсными башма-

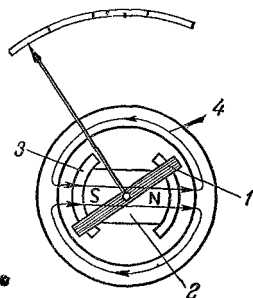


Рис. 2-5. Схема устройства магнитоэлектрического измерительного механизма с внутрирамочным магнитом.

ками 3 и стальным ярмом 4. Рамка крепится на растяжках. Такая конструкция позволяет лучше использовать энергию магнита и получить миниатюрные приборы с малой массой (меньше 100 г).

В измерительных механизмах с подвижным магнитом (рис. 2-6) магнит 1 укреплен на оси 2. Катушка 3 с измеряемым током создает магнитное поле, под воздействием которого магнит стремится занять положение, при котором ось его поля совпадает с осью поля катушки. Противодействующий момент создает пружинка 4. Для успоко-

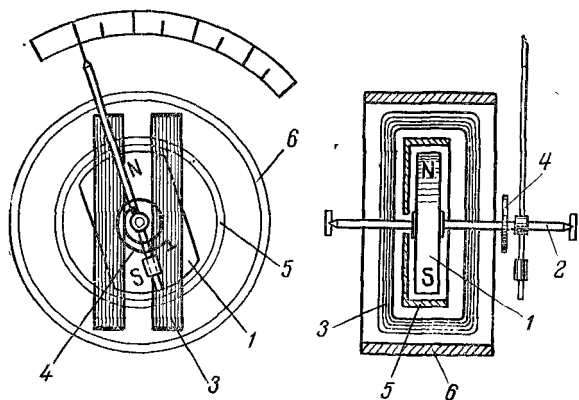


Рис. 2-6. Измерительный механизм с подвижным магнитом.

ения используется алюминиевый стакан 5, в стенках которого индуктируются токи, обеспечивающие тормозной момент. Экран 6 из пермаллоя уменьшает влияние внешнего магнитного поля.

Измерительные механизмы магнитоэлектрической системы в сочетании с выпрямителями и термопреобразователями применяются в выпрямительных, электронных и термоэлектрических приборах для измерений в цепях переменного тока. Измерительные механизмы магнитоэлектрической системы, применяемые в вибрационных гальванометрах и осциллографических гальванометрах, для измерения в цепях переменного тока выполняются с подвижной частью, обладающей малым моментом инерции и собственным периодом колебания, равным или меньшим периоду измеряемого тока.

В приборах, называемых логометрами, применяются механизмы магнитоэлектрической системы с двумя рамками, укрепленными на одной оси (рис. 2-7). Ток к рамкам подводится при помощи безмоментных подводок-ленточек, практически не создающих противодействующих моментов. Таким образом, при отсутствии вращающих моментов подвижная часть находится в положении безразличного равновесия.

Индукция в воздушном зазоре различна в отдельных его точках, что достигается формой сердечника (рис. 2-7, а)

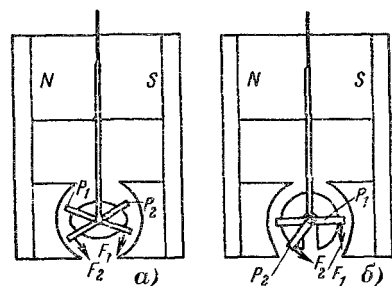


Рис. 2-7. Два варианта измерительного механизма логометра магнитоэлектрической системы.

или формой полюсных башмаков (рис. 2-7, б). Обозначив через  $B_1$  и  $B_2$  магнитную индукцию в местах расположения активных проводов первой и второй рамок, можно написать:

$$B_1 = f_1(\alpha) \quad \text{и} \quad B_2 = f_2(\alpha),$$

где  $\alpha$  — угол поворота подвижной части, отсчитываемый от нулевого деления шкалы.

Если в рамках проходят токи  $I_1$  и  $I_2$ , то возникают два вращающих момента:

$$M_1 = I_1 B_1 S_1 w_1 = I_1 S_1 w_1 f_1(\alpha) = I_1 F_1(\alpha)$$

и

$$M_2 = I_2 B_2 S_2 w_2 = I_2 S_2 w_2 f_2(\alpha) = I_2 F_2(\alpha).$$

Моменты  $M_1$  и  $M_2$  направлены в разные стороны, поэтому подвижная часть будет поворачиваться под влиянием их разности; при этом больший вращающий момент будет убывать, так как соответствующая рамка будет перемещаться в менее интенсивную часть поля; в то же время меньший момент будет возрастать вследствие того, что соответствующая рамка будет перемещаться в более интенсивную часть поля.

При определенном положении рамок моменты уравновесятся, следовательно,

$$M_1 = M_2 \quad \text{или} \quad I_1 F_1(\alpha) = I_2 F_2(\alpha),$$

откуда

$$I_1/I_2 = F_2(\alpha)/F_1(\alpha) = F_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (2-8)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части определяется отношением токов в рамках.

Измерительные механизмы без механического противодействующего момента, угол поворота которых зависит от отношения токов, называются логометрами.

Измерительные механизмы магнитоэлектрической системы, в которых используется сильное поле постоянного магнита, отличаются высокой чувствительностью к току (до 5 делений/мкА), малой мощностью потерь, малой чувствительностью к внешним магнитным полям.

Температура оказывает незначительное влияние на показание измерительного механизма, так как изменение модуля упругости материала пружин, вызванное изменением температуры, частично компенсируется изменением магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванном изменением температуры магнита.

## 2-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

В электромагнитных измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, с измеряемым током и одного или нескольких ферромагнитных сердечников.

Наибольшее распространение получили измерительные механизмы с плоской (рис. 2-8) и с круглой катушками (рис. 2-10).

Неподвижная часть измерительного механизма первого типа в основном состоит из плоской катушки *A*, магнита *M* и экрана *Э*. Подвижная часть имеет ось *B* с укрепленными на ней стальным сердечни-

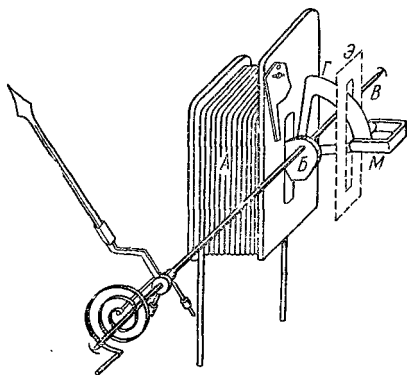


Рис. 2-8. Устройство электромагнитного амперметра с плоской катушкой.

ком  $B$ , указательной стрелкой, концом спиральной пружины и алюминиевым сектором  $\Gamma$  успокоителя.

Измеряемый постоянный ток, проходя по катушке  $A$ , намагничивает сердечник  $B$ . Сила  $F$  (рис. 2-9), втягивающая сердечник внутрь катушки, стремится переместить его в положение, при котором энергия магнитного поля  $W_M = LI^2/2$  имеет наибольшее значение.

При повороте сердечника  $B$  на угол  $d\alpha$  приращение энергии магнитного поля

$$dM_M = d(LI^2/2) = (I^2/2) dL.$$

Энергия вращательного движения, как известно из механики, определяется произведением вращающего момента  $M$  на угол поворота ( $d\alpha$ ), т. е.

$$dW = M d\alpha.$$

Поэтому

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha}. \quad (2-9)$$

Отношение  $dL/d\alpha$  есть скорость изменения индуктивности катушки при повороте сердечника. Приняв

в первом приближении отношение  $dL/d\alpha$  постоянным, получим:

$$M = k_1 I^2. \quad (2-10)$$

Положение равновесия подвижной части определяется равенством моментов

$$M = M_{пр} = D\alpha,$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I^2 = k_2 I^2. \quad (2-11)$$

Таким образом, угол поворота  $\alpha$  пропорционален квадрату тока, следовательно, шкала будет квадратичной (неравномерной.)

Выбором формы сердечника и его расположением относительно катушки можно получить различные зависимости  $dL/d\alpha = f(\alpha)$ . Обычно стремятся к тому, чтобы при малых токах отношение  $dL/d\alpha$  имело большие значения, а при больших токах — малые, вследствие чего

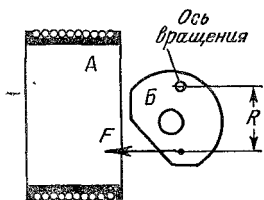


Рис. 2-9. Расположение катушки и сердечника в электромагнитном измерительном механизме.

шкала будет близкой к равномерной в ее рабочей части, т. е. от 20 до 100% номинального значения.

При прохождении по катушке переменного тока вращающий момент

$$M = k_1 i^2$$

изменяется пропорционально квадрату мгновенного значения тока.

Вследствие значительного момента инерции подвижной части и большого периода собственных колебаний угол

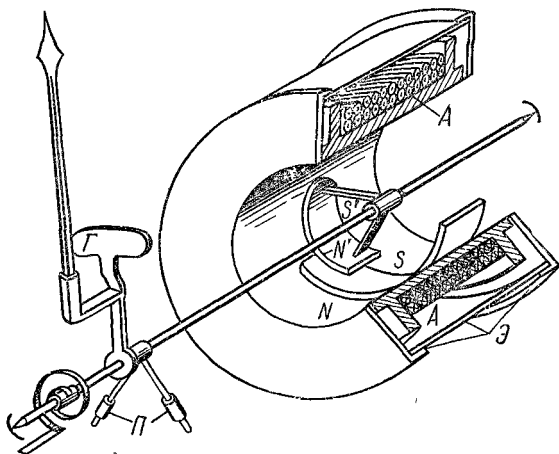


Рис. 2-10. Устройство электромагнитного измерительного механизма с круглой катушкой.

поворота ее будет определяться средним за период значением момента:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T k_1 i^2 dt = k_1 I^2,$$

так как  $\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = I^2$  (квадрату действующего значения тока), а угол поворота

$$\alpha = M_{\text{ср}}/D = k_1 I^2/D = k_2 I^2$$

будет пропорционален квадрату действующего значения тока.

Измерительный механизм с круглой катушкой (рис. 2-10) имеет неподвижную катушку *A*, внутри которой

укреплен стальной сердечник  $NS$ . С наружной стороны катушка закрыта стальным экраном  $\mathcal{E}$ , уменьшающим влияние внешнего магнитного поля. Подвижная часть имеет ось и укрепленные на ней сердечник  $N'S'$ , указательную стрелку, спиральную пружину, алюминиевый сектор  $\Gamma$  магнитоиндукционного успокоителя и противовес  $\Pi$ , уравнивающий подвижную часть. При прохождении по катушке измеряемого тока сердечники намагничиваются одноименно и отталкиваются друг от друга, так что на подвижную часть действует вращающий момент.

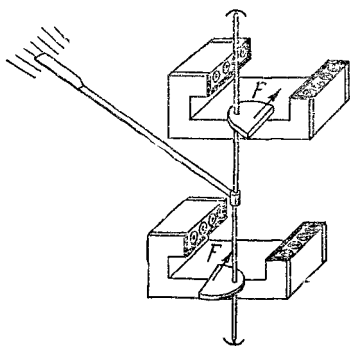


Рис. 2-11. Измерительный механизм логометра электромагнитной системы.

На каждый из сердечников действует вращающий момент, значение которого зависит от квадрата тока соответствующей катушки и угла поворота подвижной части, а знак момента — от знака производной  $dL/da$ . Для того чтобы получить вращающие моменты противоположных знаков, сердечники укрепляют на оси так (рис. 2-11), что при увеличении угла  $\alpha$  индуктивность одной из катушек увеличивается ( $dL > 0$ ), а другой уменьшается ( $dL < 0$ ).

При измерении подвижная часть устанавливается в том положении, при котором моменты уравнивают друг друга, т. е.

$$M_1 = M_2 \quad \text{или} \quad I_1^2 f_1(\alpha) = I_2^2 f_2(\alpha),$$

откуда

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F(I_1^2/I_2^2), \quad (2-12)$$



следовательно, угол поворота подвижной части определяется отношением квадратов токов в катушках логометра. Электромагнитные логометры применяются для измерения емкости, сдвига фаз (§ 10-2) и частоты переменного тока (§ 10-5).

Показания электромагнитных измерительных механизмов при нарастающих значениях постоянного тока меньше, чем при убывающих, на 2—3% вследствие влияния остаточной индукции сердечника. Применение сортов стали или сплавов с малой остаточной индукцией (пермаллой) приводит к значительному уменьшению этой погрешности, давая возможность получить приборы классов точности 0,5 и 0,2.

При переменном токе в металлических частях и сердеч-

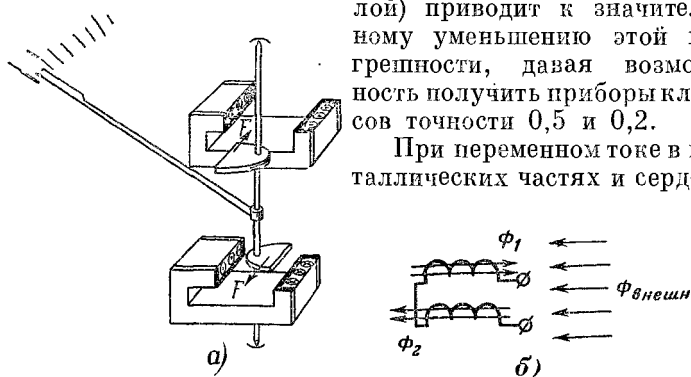


Рис. 2-12. Устройство астатического измерительного механизма электромагнитного прибора (а) и расположение магнитных полей (б).

нике возникают вихревые токи, размагничивающие последний, вследствие чего показания прибора уменьшаются. Эта погрешность от частоты, незначительная при  $f = 50$  Гц, возрастает с ее увеличением.

Магнитное поле электромагнитного прибора характеризуется небольшой индукцией, вследствие чего дополнительная погрешность от внешнего магнитного поля может быть значительной, что следует иметь в виду при установке прибора. Для уменьшения этой погрешности применяют стальные экраны (рис. 2-10) или прибегают к так называемому астатированию.

В астатическом измерительном механизме (рис. 2-12) имеются две одинаковые катушки, соединенные последовательно. Магнитные поля катушек, созданные измеряемым током, направлены противоположно, а поворот подвижной части вызывается моментами одного направления, прило-

женными к двум сердечникам, укрепленным на оси прибора.

Внешнее однородное поле, уменьшая вращающий момент, действующий на один сердечник, на столько же увеличивает вращающий момент, действующий на второй сердечник.

### 2-3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В измерительных механизмах электродинамической системы перемещение подвижной части происходит вследствие электродинамического взаимодействия между токами, проходящими по неподвижной и подвижной катушкам.

Измерительный механизм этой системы (рис. 2-13 и

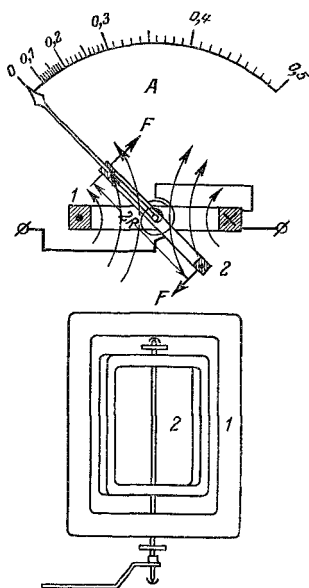


Рис. 2-13. Схема устройства измерительного механизма электродинамической системы.

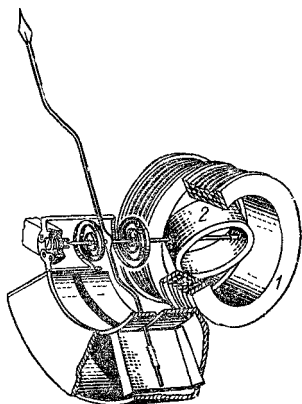


Рис. 2-14. Устройство измерительного механизма электродинамической системы.

2-14) состоит из неподвижной 1 и подвижной 2 катушек. На оси, кроме катушки 2, крепятся указательная стрелка, крыло воздушного успокоителя и концы двух спиральных пружин для подвода тока к катушке.

В магнитном поле двух катушек с постоянными токами  $I_1$  и  $I_2$ , как известно, запасается энергия

$$W_M = L_1 I_1^2 / 2 + L_2 I_2^2 / 2 + M_{12} I_1 I_2,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — индуктивности катушек;

$M_{12}$  — их взаимная индуктивность.

Взаимодействие этих токов вызывает вращающий момент, стремящийся повернуть подвижную катушку в положение, при котором энергия магнитного поля катушек будет наибольшей.

Этот момент [см. (2-9)]

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{I_1^2}{2} \frac{dL_1}{d\alpha} + \frac{I_2^2}{2} \frac{dL_2}{d\alpha} + I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha},$$

где  $d\alpha$  — приращение угла, при котором энергия поля получает приращение  $dW_M$ .

Так как индуктивности катушек  $L_1$  и  $L_2$  неизменны, то  $dL_1 = dL_2 = 0$  и вращающий момент

$$M = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (2-13)$$

Из написанного следует, что вращающий момент зависит от токов  $I_1$  и  $I_2$  и от положения подвижной катушки относительно неподвижной. Зависимость скорости изменения взаимной индуктивности от угла поворота подвижной катушки  $dM_{12}/d\alpha = f(\alpha)$  определяется формой катушек и их взаимным расположением.

Приняв в первом приближении отношение  $dM_{12}/d\alpha = k_1$  постоянным, получим выражение вращающего момента

$$M = k_1 I_1 I_2, \quad (2-14)$$

вызывающего поворот подвижной части на угол, при котором он уравнивается моментом пружин, т. е.

$$M = M_{пр} \quad \text{или} \quad k_1 I_1 I_2 = D\alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I_1 I_2 = k_2 I_1 I_2. \quad (2-15)$$

Таким образом, вращающий момент и угол поворота подвижной части пропорциональны произведению токов в катушках.

Если по катушкам измерительного механизма проходят переменные токи  $i$  и  $i_2$ , то мгновенный вращающий момент

$$M = k_1 i_1 i_2,$$

а средний за период вращающий момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = k_1 \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt. \quad (2-16)$$

Если, например, токи  $i_1$  и  $i_2$  синусоидальны и сдвинуты по фазе на угол  $\psi$ , т. е.

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad \text{и} \quad i_2 = I_{2m} \sin (\omega t - \psi),$$

то, выполнив подстановку, получим:

$$M_{\text{ср}} = k_1 \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 dt = k_1 I_1 I_2 \cos \psi. \quad (2-17)$$

Положение равновесия подвижной части определяется равенством

$$M_{\text{ср}} = M_{\text{пр}},$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I_1 I_2 \cos \psi. \quad (2-18)$$

Следовательно, при переменном токе вращающий момент и угол поворота подвижной части измерительного механизма зависят от произведения действующих значений токов в катушках и косинуса угла сдвига фаз между ними.

Измерительные механизмы логометров электродинамической системы имеют различное устройство. Схема устройства одного из них дана на рис. 2-15. Взаимодействие тока  $I$ , проходящего по неподвижной катушке  $A$ , состоящей из двух частей, с токами  $I_1$  и  $I_2$ , проходящими по подвижным катушкам  $1$  и  $2$ , создает два вращающих момента  $M_1$  и  $M_2$ , направленных в разные стороны. Разность этих моментов вызывает поворот подвижной части на угол, при котором вращающие моменты взаимно уравновесятся.

В этом случае

$$M_{1\text{ср}} = M_{2\text{ср}}$$

или

$$k_1 I I_1 \cos \psi_1 f_1(\alpha) = k_2 I I_2 \cos \psi_2 f_2(\alpha),$$

где  $\psi_1$  — сдвиг фаз между токами  $I$  и  $I_1$ ;

$\psi_2$  — сдвиг фаз между токами  $I$  и  $I_2$ .

Написанному выражению можно придать другой вид:

$$\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} = \frac{k_1 f_1(\alpha)}{k_2 f_2(\alpha)} = f_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F \left( \frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} \right). \quad (2-19)$$

Написанное выражение показывает, что угол поворота подвижной части логометра определяется отношением слагающих токов в подвижных катушках, совпадающих по фазе с током в неподвижной катушке (рис 2-15, векторная диаграмма).

Отсутствие стальных деталей в измерительном механизме, а следовательно, отсутствие погрешности от гистерезиса и вихревых токов делает возможным изготавливать механизмы этой системы, обеспечивающие высокую точ-

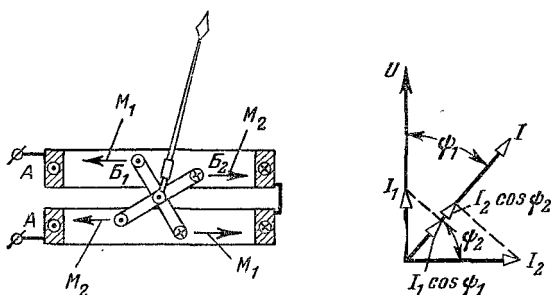


Рис. 2-15. Схема устройства измерительного механизма логометра электродинамической системы и его векторная диаграмма.

ность измерений. Слабое магнитное поле электродинамических механизмов обеспечивает получение только небольших вращающих моментов, что требует уменьшения трения в опорах и погрешности от трения. Последнее достигается возможным уменьшением массы подвижной части, тщательным подбором материалов для опор и осей и соответствующей их обработке. Все это, с одной стороны, повышает стоимость прибора, с другой, приводит к повышенной чувствительности механизма к перегрузкам и механическим воздействиям. Следовательно, эти механизмы требуют особого ухода и обслуживания.

Слабое магнитное поле этих измерительных механизмов делает их чувствительными к влиянию внешних магнитных полей, как это имело место в электромагнитных измерителях. Для уменьшения этой чувствительности применяются рассмотренные в § 2-2 средства: астатирование и экранирование.

Астатический измерительный механизм (рис. 2-16) содержит две пары катушек. Поля неподвижных катушек направлены взаимно противоположно. Также противоположно направлены токи в подвижных катушках, поэтому вращающие моменты, действующие на подвижные катушки, направлены одинаково. Ослабление влияния внешнего поля производится, как было показано в § 2-2.

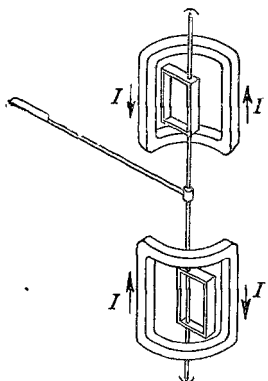


Рис. 2-16. Устройство астатического измерительного механизма электродинамической системы.

#### 2-4. ФЕРРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Ферродинамические измерительные механизмы были предложены в 1913 г. М. О. Доливо-Добровольским.

Ферродинамический измерительный механизм, представляя разновидность электродинамического, отличается от последнего наличием магнитопровода из магнитомягкого материала. Устройство одного из механизмов этой системы показано на рис. 2-17.

Две половины неподвижной катушки  $A_1$  и  $A_2$  расположены на стержнях магнитопровода из листовой стали. Подвижная катушка без металлического каркаса во избежание появления в нем индуктированных токов укреплена на одной оси со стрелкой.

В воздушном зазоре возникает радиальное однородное поле с индукцией, пропорциональной току в неподвижной катушке. Взаимодействие этого поля с током в подвижной катушке создает вращающий момент, который, как и в электродинамическом механизме, пропорционален произведению действующих значений токов в катушках и косинусу угла сдвига фаз между ними, т. е.

$$M_{\text{ср}} = k_1 I_1 I_2 \cos \psi.$$

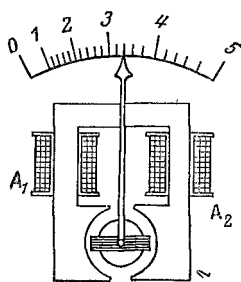


Рис. 2-17. Устройство измерительного механизма ферродинамической системы.

Малое сопротивление магнитной цепи обеспечивает получение весьма значительной индукции в воздушном зазоре и большого вращающего момента. Последнее обстоятельство дает возможность увеличить массу подвижной части без увеличения погрешности от трения и получить прочную подвижную часть.

Применение стали влечет за собой появление погрешности от гистерезиса и вихревых токов и значительное уменьшение погрешности от внешнего магнитного поля. Последнее обстоятельство менее существен-

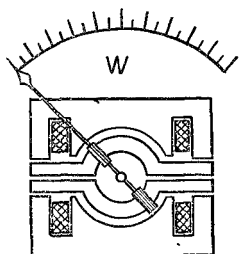


Рис. 2-18. Схема устройства измерительного механизма ферродинамической системы с двумя элементами.

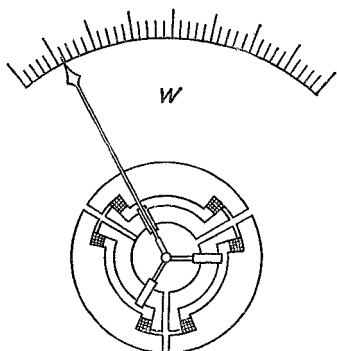


Рис. 2-19. Схема устройства измерительного механизма ферродинамической системы с тремя элементами.

но, так как имеются эффективные средства защиты от влияния внешнего магнитного поля (астатирование, экранирование). Поэтому более существенной является большая основная погрешность приборов ферродинамической системы (по сравнению с погрешностью электродинамических приборов).

На рис. 2-18 и 2-19 показаны устройства измерительных механизмов с двумя и тремя элементами, каждый из которых имеет неподвижную и подвижную катушки. Подвижные катушки укреплены на одной оси со стрелкой. Вращающий момент, действующий на подвижную часть, равен алгебраической сумме моментов отдельных элементов.

На рис. 2-20 показана схема устройства одного из ферродинамических логометров. Две неподвижные катушки  $A_1$  и  $A_2$  укреплены на стальных сердечниках. Две подвиж-

ные катушки  $B_1$  и  $B_2$  укреплены на оси. Ток к подвижным катушкам подводится при помощи безмоментных подводок. Катушки  $A_1$  и  $B_1$ , соединенные последовательно, при прохождении тока  $I_1$  создают вращающий момент  $M_1$ , действующий на катушку  $B_1$ . Аналогично при прохождении тока  $I_2$  по катушкам  $A_2$  и  $B_2$  создается второй вращающий момент  $M_2$ , действующий на катушку  $B_2$ .

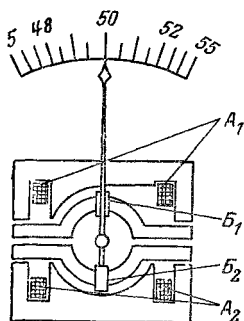


Рис. 2-20. Схема устройства измерительного механизма логометра ферродинамической системы.

Разность моментов вызывает поворот подвижной части логометра до тех пор, пока моменты не уравновесят друг друга. При этом

$$M_1 = M_2 \quad \text{или} \quad kI_1^2 f_1(\alpha) = kI_2^2 f_2(\alpha),$$

откуда

$$I_1/I_2 = f_2(\alpha)/f_1(\alpha) = f_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (2-20)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части рассмотренного ферродинамического логометра определяется отношением квадратов токов, проходящих по его катушкам. Эти логометры применяются для измерения частоты, сдвига фаз, емкости и т. п.

## 2-5. ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА

В индукционных измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия переменных магнитных потоков с токами, наведенными в диске подвижной части механизма.

Схема устройства двухпоточного индукционного механизма дана на рис. 2-21. Алюминиевый диск, укрепленный на оси, охватывается двумя электромагнитами  $A$  и  $B$ , по обмоткам которых проходят синусоидальные токи  $I_1$  и  $I_2$ , сдвинутые по фазе на угол  $\psi$  (рис. 2-22). Эти токи вызывают магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , совпадающие по фазе с возбуждающими их токами. Магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , пронизывая диск  $D$ , индуцируют в нем э. д. с.  $E'_1$  и  $E'_2$ , отстающие по фазе от соответствующих потоков на угол  $\pi/2$ . Эти э. д. с. вызывают в диске вихревые токи  $I'_1$  ( $i'_1$ ) и  $I'_2$  ( $i'_2$ ), показанные на рис. 2-23. Пгелебрегая индуктив-



ностью диска, можно считать токи  $I'_1$  и  $I'_2$  совпадающими по фазе с соответствующими э. д. с.  $E'_1$  и  $E'_2$  (рис. 2-22).

На рис. 2-23 крестиками показаны произвольно выбранные положительные направления магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и найденные по правилу буравчика положительные направления вихревых токов  $i'_1$  и  $i'_2$ .

Взаимодействия тока  $i'_1$  и потока  $\Phi_2$ , а также тока  $i'_2$  и потока  $\Phi_1$  вызывают вращающие моменты  $M_1$  и  $M_2$ , действующие на диск, положительные направления которых, найденные по правилу левой руки, показаны на рис. 2-23.

Среднее за период значение первого момента

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T k\Phi_2 i'_1 dt.$$

Полученный интеграл известен из электротехники и встречался выше. Действительно, среднее за период зна-

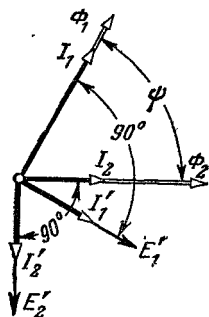


Рис. 2-22. Векторная диаграмма индукционного измерительного механизма.

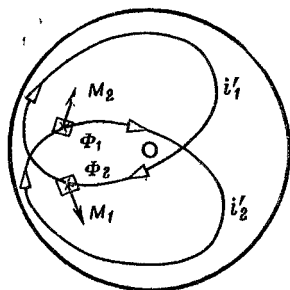


Рис. 2-23. Вихревые токи в диске индукционного измерительного механизма.

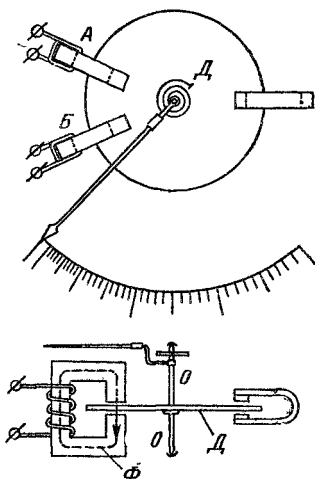


Рис. 2-21. Устройство индукционного измерительного механизма.

чение произведения двух синусоидальных величин равно половине произведения их амплитудных значений и коси-

нуса угла сдвига между ними, поэтому

$$M_1 = k_1 \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_{m2} I_1 \cos(90^\circ - \psi) = \frac{k_1}{\sqrt{2}} \Phi_{m2} I_1 \sin \psi.$$

Аналогично среднее за период значение второго момента

$$M_2 = k_2 \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_{m1} I_2 \cos(90^\circ + \psi) = -\frac{k_2}{\sqrt{2}} \Phi_{m1} I_2 \sin \psi.$$

Средние значения вращающихся моментов от взаимодействия  $\Phi_1$  и  $i_1'$ , а также  $\Phi_2$  и  $i_2'$  равны нулю, так как указанные токи отстают по фазе от соответствующих магнитных потоков на углы  $90^\circ$  (рис. 2-22), а  $\cos 90^\circ = 0$ .

Результирующий момент, равный алгебраической сумме двух полученных моментов, определится с учетом направлений  $M_1$  и  $M_2$  (рис. 2-23) так:

$$M = M_1 - M_2 = \frac{k_1}{\sqrt{2}} \Phi_{m2} I_1 \sin \psi + \frac{k_2}{\sqrt{2}} \Phi_{m1} I_2 \sin \psi.$$

Наведенные в диске э. д. с. равны:

$$E_1' = c_1 f \Phi_{m1} \quad \text{и} \quad E_2' = c_2 f \Phi_{m2},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — коэффициенты пропорциональности, а  $f$  — частота синусоидального тока.

По закону Ома токи в диске равны:

$$I_1 = \frac{E_1'}{r_{д1}} = \frac{c_1}{r_{д1}} f \Phi_{m1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E_2'}{r_{д2}} = \frac{c_2}{r_{д2}} f \Phi_{m2},$$

где  $r_{д1}$  и  $r_{д2}$  — сопротивления путей тока в диске.

Подставив выражения для токов в формулу результирующего момента, получим:

$$\begin{aligned} M &= \frac{k_1 c_1}{\sqrt{2} r_{д1}} f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi + \frac{k_2 c_2}{\sqrt{2} r_{д2}} f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi = \\ &= k_3 f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi. \end{aligned} \quad (2-24)$$

Из написанного следует, что вращающий момент индукционного измерительного механизма пропорционален частоте, амплитудам магнитных потоков, пронизывающих диск, и синусу угла сдвига между потоками. Если магнитные потоки совпадают по фазе, то вращающий момент равен нулю, так как при  $\psi = 0 \sin \psi = 0$ . Наоборот, при  $\psi = 90^\circ \sin \psi = 1$  и момент имеет наибольшее значение.

Вследствие малого магнитного сопротивления цепи индукционные механизмы имеют сильное магнитное поле

и, следовательно, большой вращающий момент, прочную подвижную часть, малую чувствительность к перегрузкам и внешним магнитным полям.

Температура влияет на сопротивление диска и активное сопротивление обмоток, а следовательно, и на показания механизма.

Индукционные измерительные механизмы используются преимущественно в счетчиках электрической энергии для цепей переменного тока промышленной частоты.

## 2-6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В электростатических измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия между двумя или несколькими электрически заряженными проводниками.

Принципиальная схема устройства одного из измерительных механизмов, применяемых в вольтметрах на низкие и средние напряжения, дана на рис. 2-24. Неподвижная часть измерителя состоит из двух параллельных металлических пластин *A*, а подвижная — из секторообразной алюминиевой пластины *B*, укрепленной на оси, на которой, кроме того, укреплены стрелка и конец спиральной пружины.

При постоянном напряжении на зажимах измерительного механизма неподвижные и подвижные пластины заряжаются разноименно. Между пластинами возникает электрическое поле, под действием которого подвижная пластина втягивается в пространство между неподвижными пластинами, стремясь занять положение, при котором энергия электрического поля  $W_э = CU^2/2$  будет наибольшей. Вращающий момент [см. (2-9)]

$$M = \frac{dW_э}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{CU^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{dC}{d\alpha} \frac{U^2}{2} = \frac{1}{2} k_1 U^2, \quad (2-22)$$

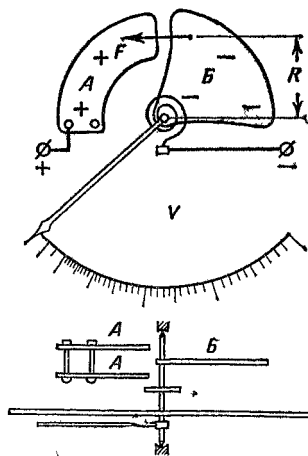


Рис. 2-24. Устройство электростатического измерительного механизма.

где  $dC/d\alpha = k_1$  — скорость изменения емкости от угла поворота подвижной части, которую в первом приближении можно считать постоянной.

Из равенства вращающего и противодействующего моментов  $M = M_{\text{пр}}$ , где, как известно,  $M_{\text{пр}} = D\alpha$ , получим:

$$\frac{1}{2} k_1 U^2 = D\alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{2D} U^2 = k_2 U^2. \quad (2-23)$$

При переменном напряжении на зажимах мгновенный момент

$$M = \frac{1}{2} k_1 u^2.$$

Средний за период момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{2} k_1 \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = \frac{1}{2} k_1 U^2,$$

а угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k_1}{2D} U^2 = k_2 U^2.$$

Следовательно, угол поворота подвижной части электростатического механизма пропорционален квадрату постоянного напряжения или квадрату действующего значения переменного напряжения на его зажимах, если производная от емкости по углу поворота подвижной части ( $dC/d\alpha$ ) — величина постоянная.

Выбором формы пластин  $A$  и  $B$  (рис. 2-25) и их взаимным расположением получают такую зависимость  $dC/d\alpha = f(\alpha)$ , при которой для малых напряжений  $dC/d\alpha$  имеет большие значения, а при больших напряжениях — малые, в результате чего шкала получается близкой к равномерной в ее рабочей части.

Для повышения чувствительности измерительных механизмов увеличивают число подвижных и неподвижных пластин, подвижную часть выполняют на растяжках (рис. 2-25) и применяют внутренний световой указатель (зеркало  $Z$ ) (§ 1-4), как, например, у электростатических вольтметров типов С-95 и С-50 с пределами измерений 30 В — 3 кВ; успокоитель  $У$  — магнитоиндукционный.

Схема устройства второй разновидности электростатических измерительных механизмов, применяемой в вольтметрах на средние и высокие напряжения (1—15 кВ), дана на рис. 2-26. Между двумя неподвижными пластинами  $A_1$  и  $A_2$  подвешена на металлических ленточках подвижная пластина  $B$ . Пластины  $A_1$  и  $B$  присоединены к одному зажиму, а пластины  $A_2$  — к другому зажиму измерительного механизма.

При постоянном напряжении на зажимах пластины  $A_1$  и  $B$ , заряженные одноименно, отталкиваются, а пластины  $B$  и  $A_2$ ,

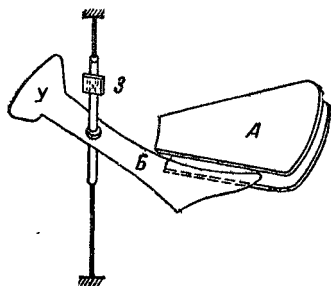


Рис. 2-25. Схема устройства электростатического вольтметра (типа С-95), имеющего внутренний световой указатель.

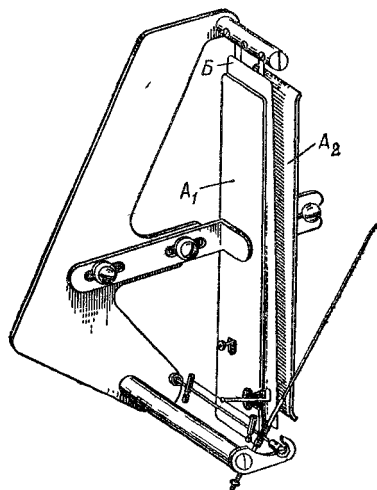


Рис. 2-26. Другая конструкция электростатического измерительного механизма.

заряженные разноименно, притягиваются так, что пластина  $B$  перемещается, приближаясь к пластине  $A_2$ . Это перемещение при помощи тяги передается указательной стрелке.

В электростатических измерительных механизмах применяют как воздушное, так и магнитоиндукционное успокоение.

Существенным является качество изоляции между пластинами измерительного механизма, для чего применяется керамическая изоляция (стеатит) с малым значением тангенса угла потерь.

На показания электростатических механизмов не влияют температура окружающей среды, частота и форма кривой напряжения, а также внешние магнитные поля,

но показания зависят от электрических полей вследствие незначительного собственного поля. Уменьшение дополнительной погрешности от внешнего электрического поля достигается применением экранов.

Входное сопротивление приборов при постоянном токе практически равно бесконечности, а при переменном токе определяется частотой изменения напряжения и емкостью механизма, которая невелика (обычно не превышает 10 пФ).

## Г л а в а   т р е т ь я

### П Р И Б О Р Ы   Н Е П О С Р Е Д С Т В Е Н Н О Й   О Ц Е Н К И Д Л Я   И З М Е Р Е Н И Я   Т О К А   И   Н А П Р Я Ж Е Н И Я

#### 3-1. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Для измерения тока в приемнике энергии  $I_{\text{пр}}$  необходимо амперметр соединить последовательно с этим приемником (рис. 3-1), так как в этом случае ток амперметра  $I_A = I_{\text{пр}}$ . Ток  $I_A$ , проходящий по амперметру, создает вращающий момент и вызывает поворот его подвижной части на угол, по которому определяют ток амперметра.

Всякий измерительный прибор, в том числе и амперметр, при его

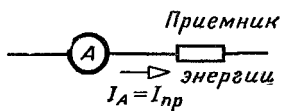


Рис. 3-1. Схема включения амперметра.

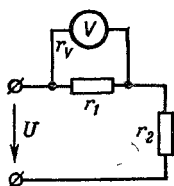


Рис. 3-2. Схема включения вольтметра.

включении не должен изменять параметры цепи и режим ее работы. Следовательно, сопротивление амперметра  $r_A$  должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника:  $r_A \ll r_{\text{пр}}$ . В этом случае токи в приемнике до включения амперметра  $I_{\text{пр}} = U/r_{\text{пр}}$  и после его включения  $I'_{\text{пр}} = U/(r_{\text{пр}} + r_A)$  будут приблизительно равны, т. е.  $I_{\text{пр}} \approx I'_{\text{пр}}$ .

Для измерения напряжения на приемнике энергии зажимы вольтметра (рис. 3-2) соединяют с зажимами

приемника так, чтобы напряжение на приемнике и на вольтметре было одинаковым, т. е.  $U_V = U_{пр}$ .

По закону Ома ток вольтметра

$$I_V = U_V / r_V = F(U_V).$$

Ток  $I_V$  вызывает поворот подвижной части прибора на угол, зависящий от его значения, а следовательно, и от значения  $U_V$ , т. е.

$$\alpha = \varphi(I_V) = \varphi[F(U_V)] = f(U_V).$$

Таким образом, по углу поворота подвижной части вольтметра определяют напряжение на его зажимах.

В противоположность амперметру сопротивление вольтметра должно быть большим по сравнению с сопротивлением приемника энергии, с тем чтобы его включение не изменило режим работы цепи.

Допустим, что указанное требование не выполняется и сопротивление вольтметра  $r_V = r_1$  (рис. 3-2). При указанном допущении, принимая  $r_2 = r_1$ , получаем: до включения вольтметра напряжения на сопротивлениях  $r_1$  и  $r_2$  одинаковы:  $U_1 = U_2 = U/2$ .

После включения вольтметра эквивалентное сопротивление первого участка цепи (рис. 3-2) равно  $r_1/2$ , а второго  $r_2 = r_1$ . Соответственно эквивалентное сопротивление всей цепи составляет  $1,5 r_1$ . При этом напряжение на сопротивлении  $r_1$ , измеренное вольтметром,

$$U_V = U'_1 = \frac{U}{1,5r_1} \cdot \frac{r_1}{2} = \frac{U}{3}.$$

Погрешность при измерении напряжения

$$\gamma = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{\frac{1}{3}U - \frac{1}{2}U}{\frac{1}{2}U} \cdot 100\% = -50\%.$$

Таким образом, включение вольтметра с относительно небольшим сопротивлением вызвало значительное изменение режима работы цепи и привело к недопустимо большой погрешности измерения.

Из сказанного ясно, что амперметр и вольтметр, имея одинаковые по устройству измерительные механизмы, отличаются параметрами и внутренними измерительными схемами и, кроме того, они различным образом включаются в испытываемую цепь.

### 3-2. ШУНТЫ

Шунт применяется для расширения предела измерения тока измерительного механизма. Он представляет собой измерительный преобразователь, состоящий из резистора, включаемого в цепь измеряемого тока, параллельно которому присоединяется измерительный механизм (рис. 3-3).

Для устранения влияния сопротивлений контактных соединений шунты снабжаются токовыми и потенциальными зажимами.

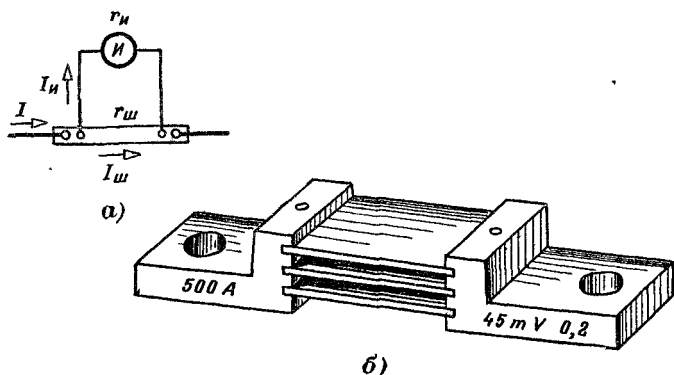


Рис. 3-3. Схема соединения измерительного механизма с шунтом (а) и внешний вид шунта (б).

Измеряемый ток цепи  $I$  и ток измерительного механизма  $I_{и}$  одной из параллельных ветвей (рис. 3-3, а) связаны соотношением

$$\begin{aligned} I_{и} &= I r_{ш} / (r_{ш} + r_{и}) \quad \text{или} \quad I = I_{и} (r_{и} / r_{ш} + 1) = \\ &= I_{и} p = C_I \alpha p, \end{aligned} \quad (3-1)$$

где  $p = r_{и} / r_{ш} + 1 = I / I_{и}$  — шунтирующий множитель, показывающий, во сколько раз измеряемый ток  $I$  больше тока  $I_{и}$  измерительного механизма или во сколько раз расширяется предел измерения тока.

Таким образом, измеряемый ток находится умножением постоянной измерительного механизма по току  $C_I$ , шунтирующего множителя  $p$  и угла поворота  $\alpha$  подвижной части измерительного механизма.

Шунтирующий множитель является неизменным при постоянных значениях  $r_{ш}$  и  $r_{и}$ .



Из приведённого выражения шунтирующего множителя следует, что

$$r_{ш} = r_{и}/(p - 1), \quad (3-2)$$

т. е. для расширения предела измерения в  $p$  раз необходим шунт с сопротивлением в  $(p - 1)$  раз меньшим сопротивления измерительного механизма.

Переносные приборы часто снабжаются многопредельными шунтами (рис. 3-4 — 3-6). Такой шунт состоит из нескольких резисторов, переключаемых в зависимости от предела измерения штепселем, рычажным переключателем или переносом провода с одного зажима на другой.

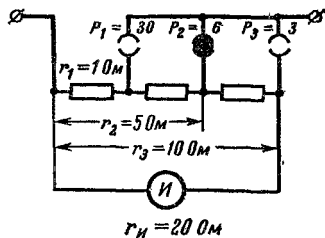


Рис. 3-4. Многопредельный шунт со штепсельным переключателем.

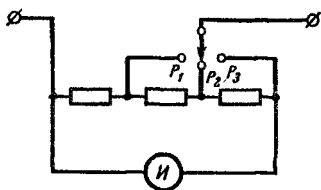


Рис. 3-6. Многопредельный шунт с отдельными выводами.

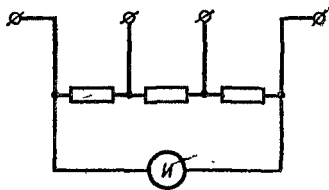


Рис. 3-5. Многопредельный шунт с рычажным переключателем.

Для любого положения штепселя (рис. 3-4) измеряемый ток [см. (3-1)]

$$I = I_{и} \left( \frac{r_{и} + r_{д}}{r_{ш}} + 1 \right) = I_{и} \frac{r}{r_{ш}} = I_{и} p, \quad (3-3)$$

где  $r_{д}$  — сопротивление добавочного резистора, соединенное последовательно с измерительным механизмом;

$r$  — постоянное сопротивление контура шунта и измерительного механизма при его последовательном обходе.

Таким образом, при неизменном сопротивлении контура шунтирующий множитель зависит только от сопротивления шунта.

Шунты изготавливаются из манганина и других материалов и снабжаются двумя парами зажимов: токовыми для включения в цепь и потенциальными для присоединения измерительного механизма. Такое включение устраняет погрешности от контактных сопротивлений.

Сечение шунта должно быть достаточно большим, с тем чтобы не было нагревания шунта током и связанной с ним температурной погрешности.

Внутренние шунты встраиваются в корпус прибора.

Наружные шунты выполняются в виде отдельной детали и соединяются с прибором специальными проводами. Индивидуальный шунт должен применяться только с тем прибором, который градуировался с данным шунтом.

Калиброванный шунт может применяться с прибором, номинальное напряжение которого соответствует указанному на шунте напряжению (45, 75, 100 или 150 мВ).

По точности шунты делятся на классы 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1. Число класса точности обозначает допустимое отклонение сопротивления в процентах его номинального значения.

Шунты преимущественно применяются в цепях постоянного тока, так как при переменном токе распределение токов в параллельных ветвях зависит от индуктивности и частоты, что усложняет их применение и сопряжено с погрешностями.

Шунты широко применяются с измерительными механизмами магнитоэлектрической системы, которые могут изготавливаться на малые номинальные напряжения 45—150 мВ.

### 3-3. ДОБАВОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Добавочный резистор, представляющий собой измерительный преобразователь, применяется для расширения предела измерения напряжения и для исключения влияния температуры на сопротивление вольтметра  $r_V$ . Добавочный резистор изготавливается из манганина и включается последовательно с измерительным механизмом (рис. 3-7).

Если предел измерения напряжения измерительного механизма необходимо расширить в  $p$  раз, то, используя обозначения рис. 3-7, запишем:

$$U = U_{иp} = U_{и} + U_{д} = I_{и} (r_{и} + r_{д}),$$

откуда сопротивление добавочного резистора

$$r_d = (U_{иp} - I_{и}r_{и})/I_{и} = (I_{и}r_{и}p - I_{и}r_{и})/I_{и}$$

или

$$r_d = r_{и}(p - 1), \quad (3-4)$$

т. е. оно должно быть в  $(p - 1)$  раз больше сопротивления измерительного механизма.

Если сопротивления измерительного механизма и добавочного резистора известны, то по (3-4) множитель добавочного сопротивления

$$p = r_d/r_{и} + 1. \quad (3-5)$$

Обмотка рамки измерительного механизма выполняется обычно из меди, имеющей температурный коэффициент  $\beta_{мд} = 0,004$  1/град, т. е. сопротивление ее изменяется на 4% при изменении температуры на 10 °С.

Включив последовательно с обмоткой добавочный резистор из манганина  $\beta_{мн} \approx 0$ , получим температурный коэффициент всего вольтметра

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\beta_{мд}r_{и} + \beta_{мн}r_d}{r_{и} + r_d} = \\ &= \frac{\beta_{мд}r_{и} + 0r_d}{r_{и} + r_d} = \beta_{мд} \frac{r_{и}}{r_{и} + r_d}. \end{aligned} \quad (3-6)$$

Взяв, например, добавочное сопротивление в 19 раз больше сопротивления обмотки рамки, получим температурный коэффициент вольтметра в 20 раз меньше, следовательно, во столько же раз будет меньше и температурная погрешность вольтметра.

Таким образом, добавочный резистор не только расширяет предел измерения напряжения, но и уменьшает температурную погрешность вольтметра.

В переносных приборах часто применяют добавочные резисторы, состоящие из нескольких частей (рис. 3-8), что позволяет иметь вольтметры на несколько пределов измерения.

Добавочные резисторы для постоянного тока наматываются обычно, а для переменного тока — бифилярно для получения безреактивного резистора. Намотка производится изолированным проводом на пластины или каркасы из пластмассы.

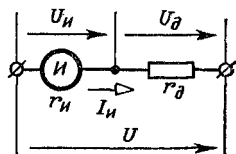


Рис. 3-7. Схема соединения измерительного механизма с добавочным резистором.

Применяются внутренние и наружные добавочные резисторы. Последние выполняют в виде самостоятельных устройств и подразделяют на индивидуальные и калиброванные. Индивидуальные резисторы применяют только с тем прибором, который градуировался с ним. Калиброванный резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен номинальному току добавочного резистора.

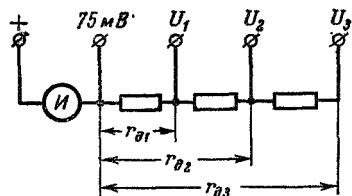


Рис. 3-8. Схема соединения измерительного механизма с многопредельным добавочным сопротивлением (вольтметр).

Калиброванные добавочные резисторы, так же как и шунты, делят на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1. Они изготавливаются на номинальные токи 0,5; 1; 3; 5; 7,5; 15 и 30 мА.

Калиброванные добавочные резисторы, так же как и шунты, делят на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1. Они изготавливаются на номинальные токи 0,5; 1; 3; 5; 7,5; 15 и 30 мА.

### 3-4. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Магнитоэлектрические приборы для измерения малых токов — микроамперметры, или миллиамперметры, представляют собой в простейшем случае измерительный механизм, обмотка которого присоединена непосредственно к внешним зажимам. Поэтому при включении прибора в цепь измеряемый ток идет по его обмотке. В этом случае изменение температуры окружающей среды не вызывает дополнительной температурной погрешности, так как изменение сопротивления медной обмотки не влияет на ток, который определяется главным образом сопротивлением приемника энергии (рис. 3-1).

Большинство амперметров и часть миллиамперметров магнитоэлектрической системы представляют собой измерительные механизмы, снабженные шунтом (рис. 3-3). У таких приборов изменение температуры окружающей среды вызывает изменение сопротивления медной обмотки, а сопротивление шунта остается неизменным, так как он изготавливается из манганина. Это приводит к перераспределению токов в параллельных ветвях прибора, изменению шунтирующего множителя и, следовательно, к дополнительной погрешности от температуры около 4% при изменении температуры на 10 °С.

Для уменьшения температурной погрешности прибора уменьшают температурный коэффициент ветви измерительного механизма, что обеспечивается включением в эту ветвь добавочного резистора из манганина (рис. 3-9). Добавочные резисторы применяются у амперметров классов точности 1; 1,5 и 2,5. Амперметры более высоких классов точности имеют более сложные схемы температурной компенсации.

Вольтметр магнитоэлектрической системы представляет собой измерительный механизм и последовательно соединенный добавочный резистор из манганина, который (§ 3-3) расширяет предел изменения напряжения и обеспечивает температурную компенсацию.

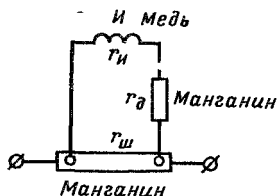


Рис. 3-9. Схема температурной компенсации технического амперметра.

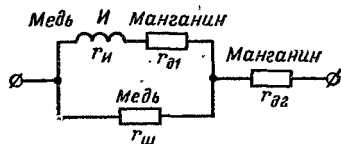


Рис. 3-10. Схема температурной компенсации лабораторных приборов.

В милливольтметрах классов точности 0,2 и 0,5 при относительно небольших сопротивлениях их обмоток нельзя получить достаточную компенсацию при последовательной схеме (рис. 3-7) с одним добавочным резистором, поэтому применяют последовательно-параллельную схему компенсации (рис. 3-10). При повышении температуры увеличивается эквивалентное сопротивление разветвления главным образом вследствие увеличения сопротивления медного шунта. При неизменном напряжении на зажимах цепи увеличение сопротивления разветвления вызовет уменьшение тока цепи и напряжения на сопротивлении  $r_{д2}$  и, следовательно, увеличение напряжения на разветвлении.

Если относительное увеличение сопротивления ветви измерителя подобрать равным относительному увеличению напряжения на разветвлении, то на ток измерителя не будет влиять изменение температуры, т. е. достигается температурная компенсация.

Милливольтметр можно применить для измерения тока, если присоединить к его зажимам шунт. Такая схема с шунтом, помещенным внутри прибора, широко используется в выпускаемых нашими заводами милливольтамперметрах.

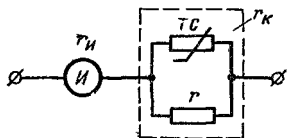


Рис. 3-11. Схема температурной компенсации с применением термокомпенсатора.

Для температурной компенсации применяется также схема с термокомпенсатором (рис. 3-11). Он состоит из нелинейного терморезистора  $TC$  и резистора  $r$  из манганина. Термокомпенсатор в диапазоне  $20 \pm 10^\circ C$  имеет зависимость

от температуры, близкую к линейной, и обеспечивает надежную компенсацию магнитоэлектрических милливольтметров.

Схема многопредельного магнитоэлектрического вольтметра класса точности 0,2 типа М106 дана на рис. 3-12.

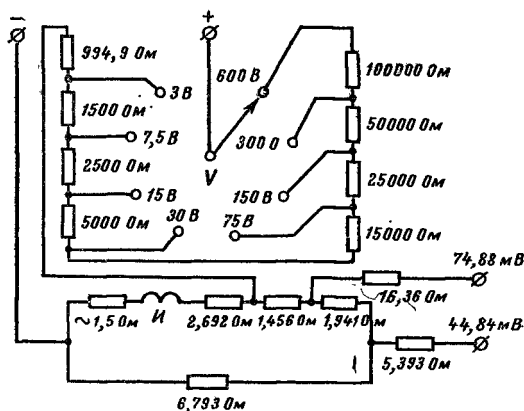


Рис. 3-12. Принципиальная схема вольтметра типа М106.

Для номинальных напряжений 45 и 75 мВ используются зажимы «минус» и соответственно 44,84 или 74,88 мВ, к которым при помощи калиброванных проводов подводится измеряемое напряжение. Восемь других пределов измерения устанавливаются рычажным переключателем, при этом используются зажимы «минус» и «плюс».

Применяя стандартные шунты на 45 и 75 мВ, можно использовать прибор в качестве амперметра.

Положительные свойства магнитоэлектрических приборов: большая точность, высокая чувствительность, малое влияние внешних магнитных полей, незначительное влияние температуры, малая мощность потерь, равномерная шкала, хорошее успокоение.

Отрицательные свойства магнитоэлектрических приборов: пригодность только для постоянного тока, чувствительность к перегрузкам, высокая стоимость.

Достоинства магнитоэлектрических приборов обеспечили им широкое распространение. Они применяются как образцовые и лабораторные приборы в цепях постоянного тока, а также там, где требуются повышенная чувствительность и точность.

Отечественная промышленность выпускает переносные многопредельные амперметры и вольтметры высших классов точности и щитовые приборы классов 1,0; 1,5 и 2,5.

### 3-5. ГАЛЬВАНОМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Гальванометры — это приборы высокой чувствительности для измерения тока, напряжения и количества электричества, шкала которых градуируется наблюдателем.

Из всех систем гальванометров наибольшее распространение получили для постоянного тока — магнитоэлектрические гальванометры с неподвижным магнитом и для переменного тока — магнитоэлектрические вибрационные гальванометры с подвижным магнитом.

Гальванометры применяют: 1) для измерения малых токов и напряжений; 2) для фиксации равенства потенциалов двух точек цепи (нуль тока) — нулевые гальванометры; 3) для определения равенства двух токов — дифференциальные гальванометры; 4) для измерения количества электричества, импульса тока — баллистические.

Гальванометры переменного тока применяются для измерения малых действующих значений тока или в большинстве случаев как нулевые гальванометры.

По способу отсчета различают гальванометры с зеркальным отсчетом, имеющие высшую чувствительность  $1 \cdot 10^7$  —  $1 \cdot 10^{10}$  мм/А, и гальванометры со стрелочным и световым отсчетом, имеющие меньшую чувствительность  $1 \cdot 10^5$  —  $1 \cdot 10^7$  мм/А.

а) *Магнитоэлектрические гальванометры для измерения постоянного тока и напряжения*

Устройство измерительных механизмов стрелочных магнитоэлектрических гальванометров аналогично рассмотренным выше измерительным механизмам миллиам-

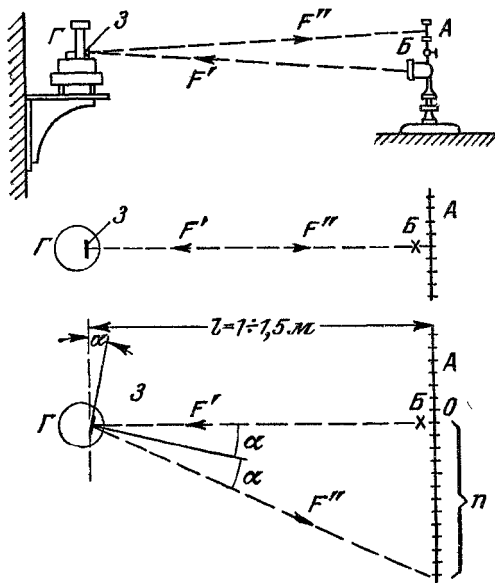


Рис. 3-13. Зеркальный отсчет (горизонтальный).

перметров той же системы. Из выражения (2-2) следует, что чувствительность прибора (гальванометра)

$$S_I = BS\omega/D \quad (3-7)$$

повышают увеличением магнитной индукции  $B$ , числа витков рамки  $\omega$  и уменьшением удельного противодействующего момента  $D$ . Последний создается растяжками или подвесом, при помощи которых крепится подвижная часть.

Дальнейшее повышение чувствительности достигается применением зеркального (светового) отсчета (рис. 3-13). Шкала  $A$  с осветителем  $B$  устанавливается на расстоянии  $1-1,5$  м от гальванометра. Луч света  $F'$  от осветителя



падает на зеркало  $Z$  подвижной части гальванометра, а отраженный от зеркала луч  $F''$  падает на шкалу, давая на ней изображение нити лампы или щели, расположенной перед лампой, — световой зайчик.

При нулевом положении подвижной части отраженный от зеркала луч падает на нулевое деление шкалы. При повороте подвижной части на угол  $\alpha$  отраженный луч повернется на угол  $2\alpha$  и световой зайчик переместится на  $n$  делений или на  $n$ , мм (принимаяем 1 деление = 1 мм). Если расстояние  $l$  от зеркала до шкалы выражено в миллиметрах, то

$$\operatorname{tg} 2\alpha = n/l. \quad (3-8)$$

При малых углах, примерно до  $3^\circ$ ,  $\operatorname{tg} 2\alpha$  можно заменить углом  $2\alpha$  и написать:

$$\alpha = n/(2l) \quad (3-9)$$

или

$$n = 2l\alpha. \quad (3-10)$$

Таким образом, при постоянном расстоянии  $l$  число делений шкалы, на которое перемещается световой зайчик, пропорционально углу поворота подвижной части гальванометра.

При зеркальном отсчете угол поворота определяется числом миллиметров линейного перемещения светового зайчика по шкале. Поэтому чувствительность гальванометра к току определяется отношением линейного перемещения светового зайчика к току, т. е.

$$S_I = n/I = 2l\alpha/I,$$

откуда линейное перемещение

$$n = 2l\alpha = S_I I.$$

Если бы тот же гальванометр имел стрелку длиной  $l_c$  и шкалу с делениями 1 мм, то линейное перемещение конца стрелки

$$n_c = l_c \alpha = S_{Ic} I.$$

Взяв отношение  $n/n_c$ , после сокращения получим:

$$S_I/S_{Ic} = 2l/l_c.$$

Таким образом, чувствительность при зеркальном отсчете увеличивается в  $2 l/l_c$  раз.

Например, при расстоянии от зеркала до шкалы  $l = 1\ 500$  мм и длине стрелки  $l_c = 100$  мм получим:

$$S_I/S_{Ic} = 2 \cdot 1\ 500/100 = 30,$$

т. е. при зеркальном отсчете чувствительность увеличится в 30 раз.

Кроме горизонтального отсчетного устройства, применяются вертикальные установки (рис. 3-14).

Устройство для субъективного отсчета состоит из шкалы и зрительной трубы, на объективе которой наносится вертикальная черта. Отклонение подвижной части наблюдается через зрительную трубу. Отсчет производится по отметке шкалы, совпадающей с вертикальной чертой (рис. 3-15).

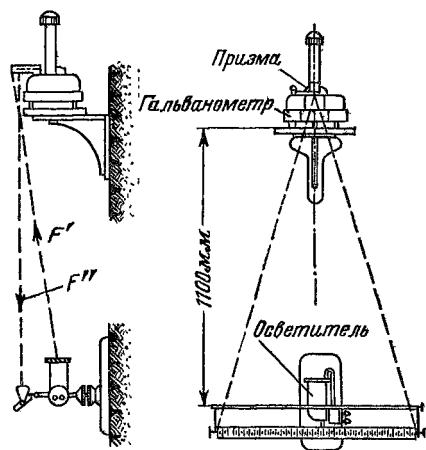


Рис. 3-14. Зеркальный отсчет (вертикальный).

При работе с гальванометром важным является его чувствительность, или постоянная, и время успокоения. В магнитоэлектрических приборах низкой чувствительности и стрелочных гальванометрах каркас рамки обеспечивает хорошее успокоение. Зеркальные гальванометры обычно выполняются с бескаркасной рамкой, так как воздушный зазор мал, а обмотка имеет большое число витков. У этих гальванометров роль успокоителя выполняет обмотка рамки.

Подвижная часть прибора, перемещаемая под действием измеряемого тока, встречает противодействие вследствие закручивания подвеса, трения рамки о воздух и электромагнитного торможения. При движении рамки в магнитном поле в ней наводится э. д. с. (рамка становится источником э. д. с.) и под действием ее в замкнутой цепи гальванометра возникает ток. Этот ток, взаимодействуя с полем магнита, создает электромагнитное торможение. Кроме того, происходит нагревание цепи, т. е. потеря энергии на электромагнитное торможение.

В зависимости от соотношений между моментом инерции подвижной части  $J$ , удельным противодействующим моментом  $D$ , магнитной индукцией  $B$ , площадью рамки  $S$ ,

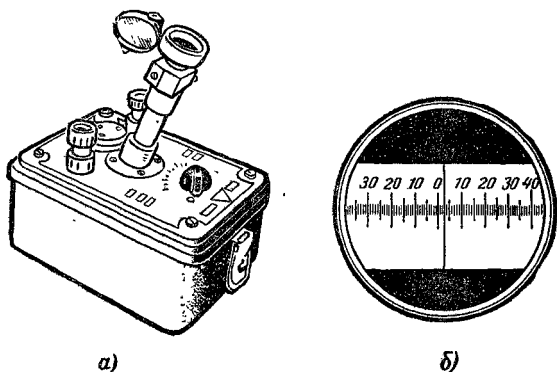


Рис. 3-15. Гальванометр с субъективным отсчетом (а) и вид шкалы через зрительную трубу (б).

числом витков рамки  $w$  и сопротивлением цепи гальванометра будет различный характер движения подвижной части гальванометра и различное время успокоения.

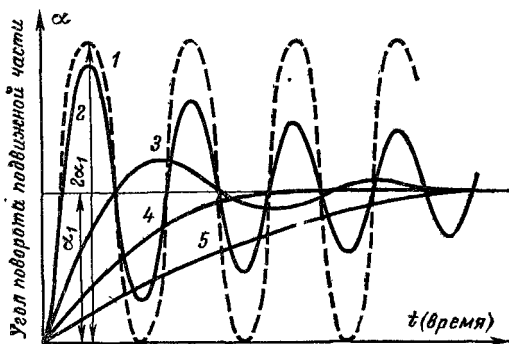


Рис. 3-16. Кривые движения подвижной части гальванометра при его включении.

В идеальном случае, при отсутствии трения и электромагнитного торможения, подвижная часть после включения гальванометра в цепь отклонится под действием вращающего момента на угол  $\alpha_1$  (рис. 3-16), при котором  $M = M_{цр}$ .

Но так как к этому положению равновесия подвижная часть подошла с некоторой скоростью, то, следовательно, она обладает некоторой кинетической энергией. За счет этой энергии подвижная часть продолжит свое движение в ту же сторону, пока эта энергия не превратится в потенциальную (подвес закручен). При этом подвижная часть будет отклонена на угол  $2\alpha_1$ . После этого под влиянием потенциальной энергии пружин она начнет обратное движение и подойдет с некоторой скоростью к положению равновесия  $\alpha_1$ . Затем под влиянием кинетической энергии подвижная часть перейдет это положение равновесия,

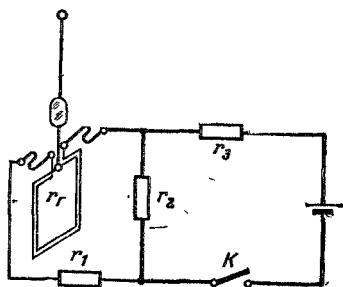


Рис. 3-17. Рамка зеркального гальванометра в электрической цепи.

дойдет до исходного положения, и процесс начнет повторяться. Следовательно, подвижная часть гальванометра после включения его в цепь совершает незатухающие колебания с периодом  $T_0$  (кривая 1, рис. 3-16).

Допустим, что имеется трение рамки о воздух, но отсутствует электромагнитное торможение (сопротивление цепи гальванометра равно бесконечности). В таком случае подвижная часть

после включения гальванометра подойдет к положению равновесия, определяемому равенством моментов  $M = M_{\text{пр}}$  через длинный ряд слабо затухающих колебаний (кривая 2, рис. 3-16). Для электромагнитного торможения существенное значение имеет сопротивление цепи тока. Уменьшая сопротивление, на которое замкнут гальванометр ( $r_1$  и  $r_2$  на рис. 3-17), мы увеличиваем ток, вызывающий торможение рамки, а следовательно, увеличиваем само торможение. При этом увеличивается затухание колебаний и уменьшается время успокоения (кривая 3, рис. 3-16). Уменьшая сопротивление, на которое замкнут гальванометр, можно найти такое его значение, при котором движение подвижной части гальванометра будет уже аperiodическим, а время успокоения — наименьшим (кривая 4, рис. 3-16). При дальнейшем уменьшении сопротивления сохраняется характер движения рамки, но движение замедляется, а время успокоения увеличивается (кривая 5, рис. 3-16).

Наибольшее сопротивление, при замыкании на которое подвижная часть гальванометра движется аperiодически, называется внешним критическим сопротивлением гальванометра, а гальванометр — критически успокоенным. Сопротивление, равное сумме внешнего критического сопротивления и сопротивления гальванометра, называется полным критическим сопротивлением гальванометра.

При замыкании гальванометра на сопротивление, большее его внешнего критического, движение подвижной части будет колебательным — гальванометр недоуспокоен.

Для быстроты производства измерений следует работать или с критически успокоенным, или лучше с несколько недоуспокоенным гальванометром.

Отметим, что полное критическое сопротивление

$$r_{\text{кр.полн}} = B^2 S^2 w^2 / (2 \sqrt{jD}). \quad (3-11)$$

Для каждого гальванометра при неизменной магнитной индукции в его воздушном зазоре критическое сопротивление является постоянной величиной, которая обычно указывается заводом. При изменении магнитной индукции в зазоре гальванометра, например при применении магнитного шунта, критическое сопротивление гальванометра изменяется.

Если при использовании гальванометра для измерений тока мы характеризовали гальванометр его постоянной по току  $C_I = I/\alpha$  или его чувствительностью к току  $S_I = 1/C_I = \alpha/I$ , то при использовании гальванометра для измерения напряжения его следует характеризовать постоянной по напряжению  $C_U = U_r/\alpha$  или его чувствительностью к напряжению

$$S_U = \alpha/U_r. \quad (3-12)$$

Напряжение на зажимах гальванометра  $U_r = I r_r$ . Поэтому

$$S_U = \alpha/(I r_r) = S_I/r_r. \quad (3-13)$$

Так как рекомендуется работать с критически успокоенным гальванометром, то практический интерес представляет величина

$$S'_U = S_I/r_{\text{кр.полн}} = \alpha/I r_{\text{кр.полн}}, \quad (3-14)$$

т. е. под чувствительностью гальванометра по напряжению часто понимают отношение угла поворота его подвижной части, или числа миллиметров шкалы, на которое переме-

щается световой зайчик, к единице напряжения (э. д. с.), действующей в цепи критически успокоенного гальванометра.

Из сказанного также следует, что чувствительность гальванометра к напряжению равна его чувствительности к току, деленной на критическое сопротивление гальванометра.

Чувствительность гальванометра к току изменяется пропорционально произведению  $BSw$  (3-7), а критическое сопротивление гальванометра изменяется пропорционально второй степени произведения  $BSw$  (3-11); поэтому увеличение чувствительности к току за счет увеличения произведения  $BSw$  приводит к уменьшению чувствительности к напряжению.

Таким образом, большей чувствительностью к напряжению обладают гальванометры с меньшей чувствительностью к току и меньшим критическим сопротивлением.

### б) Дифференциальный гальванометр

Устройство дифференциальных гальванометров такое же, как и ранее рассмотренных, но они имеют не одну, а две одинаковые обмотки, по которым токи ( $I_1$  и  $I_2$ ) проходят в противоположных направлениях. Вращающий момент и угол поворота рамки пропорциональны разности токов, т. е.

$$\alpha = (I_1 - I_2)/C_I = \Delta I/C_I. \quad (3-15)$$

Таким образом, при  $I_1 = I_2$  угол поворота  $\alpha = 0$ , что позволяет в процессе сравнения двух токов устанавливать их равенство. Дифференциальные гальванометры можно применить, например, для измерений сопротивлений, сравнивая токи в измеряемом и образцовом сопротивлении при их параллельном соединении.

### в) Баллистический гальванометр

Этот тип гальванометра конструктивно отличается от предыдущих (для измерения тока) большим моментом инерции  $J$  его подвижной части, что достигается увеличением массы подвижной части, например, за счет применения двух или четырех грузиков, как это показано на рис. 3-18. Увеличенные моменты инерции приводят к значительному увеличению периода (до 20 с) незатухающих колебаний подвижной части,  $T_0 = 2\pi \sqrt{J/D}$ .

Импульсу тока  $i_r$ , проходящему в течение времени  $t$  через рамку баллистического гальванометра, соответствует количество электричества  $Q = \int_0^t i_r dt$  и отброс рамки на некоторый угол  $\alpha_R$  (рис. 3-18). Затем после ряда затухающих колебаний или аperiодически рамка возвратится в начальное положение. Можно доказать, что отброс подвижной части  $\alpha_R$  пропорционален количеству электричества, протекающему через гальванометр, если

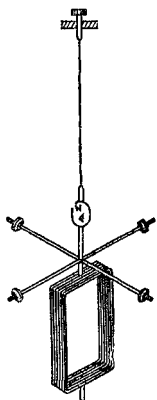


Рис. 3-18. Подвижная часть баллистического гальванометра.

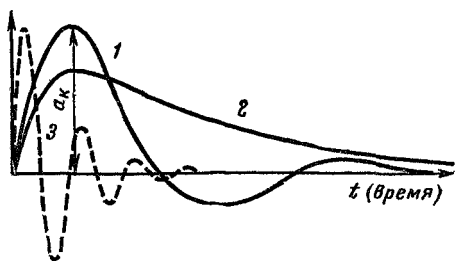


Рис. 3-19. Кривые движения подвижной части баллистического гальванометра. 1 и 2 — при различных успокоениях; 3 — с малым периодом колебаний.

продолжительность протекания его меньше одной десятой периода колебания подвижной части. При этом допущении

$$Q = C_q \alpha_R, \quad (3-16)$$

где  $C_q = Q/\alpha_R$  — баллистическая постоянная — количество электричества, соответствующее отбросу подвижной части на одно деление шкалы.

Величина, обратная баллистической постоянной,

$$S_q = 1/C_q = \alpha_R/Q \quad (3-17)$$

называется баллистической чувствительностью гальванометра.

Из изложенного следует, что для получения точного измерения нужен гальванометр с большим периодом колебаний, в десятки раз превышающим длительность импульса.

Кроме того, чтобы успеть произвести отсчет наибольшего отброса  $\alpha_K$ , также нужен гальванометр с большим периодом колебаний, так как последний определяет продолжительность наибольшего отброса  $\alpha_K$ .

Для критически успокоенного гальванометра его баллистическую постоянную можно определить по формуле

$$C_q = C_I \frac{T_0}{2\pi} e, \quad (3-18)$$

где  $e = 2,72$  (основание натуральных логарифмов).

### г) Примеры гальванометров

На рис. 3-20 дана схема устройства зеркального гальванометра типа М17. Рамка с зеркалом *З* укреплена на подвесе. Ток к рамке подводится через подвес и безмоментную подводку *П*. Магнитная индукция в воздушном зазоре регулируется магнитным шунтом *МШ* при помощи винта *В*.

Завод «Вибратор» выпускает единую серию гальванометров типа М17, параметры некоторых из них даны в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Основные параметры гальванометров М17

Тип гальванометра	$r_r$ , Ом	$r_{кр}$ , Ом	$C_I$ , (А/мм) м × × 10 <sup>-9</sup>	$C_U$ , (В/мм) м × × 10 <sup>-6</sup>	$C_{\phi}$ , (Кл/мм) м × × 10 <sup>-9</sup>	$C_{\psi}$ , (Вб/мм) м × × 10 <sup>-6</sup>	$T_0$ , с
М17/1	12	40	3,2	0,17	—	—	6
М17/4	35	630	2	1,2	—	—	4
М17/5	70	1 600	1,2	2,0	—	—	4
М17/7	350	10 000	0,5	5,0	—	—	4
М17/10	2 500	160 000	0,02	3,0	—	—	13
М17/13:							
I обмотка	15	100	1,4	0,7	—	1,4	—
II обмотка	4 000	63 000	0,06	—	0,5	—	18
М17/4 дифференциальный	2 × 100	1 600	1	1,6	—	—	5

Примечания: 1. Значения  $r_{кр}$ ,  $C_I$  и  $C_U$  даны для положения магнитного шунта «выведен».

2. При введенном положении магнитного шунта  $C_I$  и  $C_U$  увеличиваются в несколько раз, а  $r_{кр}$  значительно уменьшается.



На рис. 3-21 показан переносный магнитоэлектрический нулевой гальванометр типа М195 со световым указателем. Внутреннее сопротивление гальванометров М195/1, М195/2,

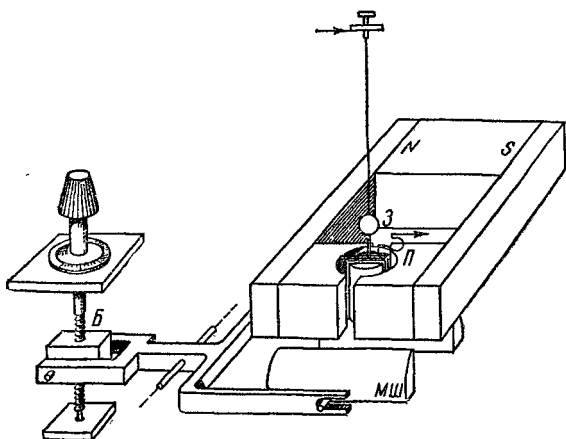
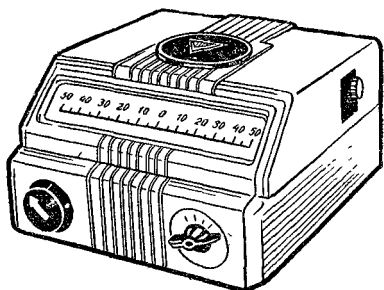


Рис. 3-20. Схема устройства зеркального гальванометра типа М17.

М195/3 соответственно 50, 150 и 1 700 Ом, внешнее критическое сопротивление равно 3 000 и 15 000 Ом; постоянная по току  $C_I$  равна 12; 4,6 и  $1,8 \times 10^{-9}$  А/деление, период колебаний  $T = 3$  с. Внутренний шунт позволяет изменять постоянную  $C_I$  в 10 и 100 раз.

Рис. 3-21. Гальванометр типа М-195 со световым указателем.



Промышленность выпускает также переносные гальванометры типа М196 с внутрирамочным магнитом (рис. 3-15) и с субъективным отсчетом, а также переносные баллистические и гальванометры типа М197.

В табл. 3-2 даны параметры переносных гальванометров.

Параметры переносных гальванометров

Тип гальванометра	$r_{г}$ , Ом	$r_{кр}$ , Ом	$C_I$ , А/деление $\times 10^{-8}$	$C_U$ , В/деление $\times 10^{-6}$	$C_q$ , Кл/деление $\times 10^{-7}$	$C_{\phi}$ , Вб/деление $\times 10^{-6}$	$T_0$ , с
M196/1	1000	3000	0,4	16	—	—	1,5
M196/2	5	5	8	0,8	—	—	1,5
M197/1	800	1009	—	—	5	5	—
M197/2	15	10	—	—	0,5	0,5	—

## д) Вибрационные гальванометры

Вибрационный или резонансный гальванометр магнито-электрической системы (рис. 3-22) имеет неподвижный электромагнит, расположенный на рис. 3-22 горизонтально;

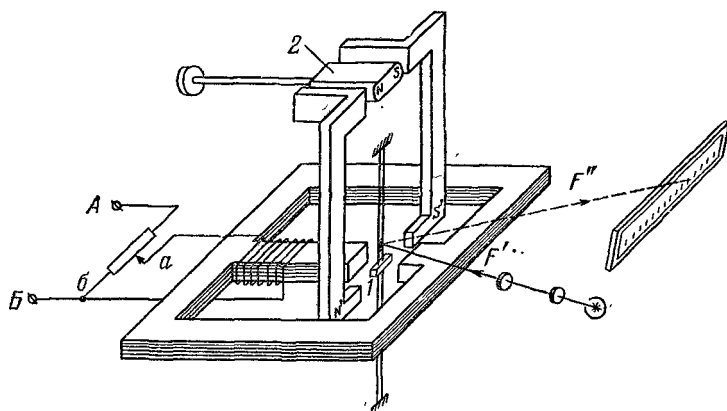


Рис. 3-22. Схема устройства вибрационного гальванометра с подвижным магнитом.

подвижную часть, состоящую из миниатюрного магнита 1 и зеркала, укрепленных на растяжках; постоянный магнит 2, поле которого участвует в создании противодействующего момента (вместе с моментом растяжек), и полюсные наконечники  $N'S'$ , примыкающие к магнитам 1 и 2.

Поворотом магнита 2 можно изменять магнитную индукцию между наконечниками  $N'S'$  до получения частоты коле-

баний подвижной части гальванометра, равной частоте измеряемого тока (режим резонанса). При этом достигается наибольшая чувствительность гальванометра.

Измеряемый переменный ток, проходя по обмотке электромагнита, создает в его воздушном зазоре переменное магнитное поле, ось которого перпендикулярна оси магнита  $I$ . Взаимодействие переменного магнитного поля с подвижным магнитом  $I$  создает вращающий момент, вызывающий колебания подвижной части с амплитудой, зависящей от тока. Отраженный от зеркала луч света дает на шкале светлую полосу, по ширине которой определяют измеряемый ток. Чувствительность гальванометра можно изменять при помощи делителя напряжения (рис. 3-22), встроенного в прибор.

Осветитель с лампой и шкалой помещается в корпусе прибора.

Гальванометр предназначен для работы в мостовых и компенсационных схемах переменного тока с частотой 30—100 Гц в качестве нулевого прибора.

Постоянная по току  $C_I = 0,9 \cdot 10^{-7}$  А/мм, а по напряжению  $C_U = 2 \cdot 10^{-5}$  В/мм.

#### е) Выбор гальванометра

Каждый гальванометр можно использовать в различных случаях измерения, но наиболее подходящим он окажется только для какого-либо определенного измерения в зависимости от его чувствительности, периода колебаний, внутреннего сопротивления и внешнего критического сопротивления. Чувствительность гальванометра не должна превышать действительно необходимую, так как излишняя чувствительность затрудняет работу. Период колебаний подвижной части гальванометров (кроме баллистических) должен быть порядка 2—8 с. Для каждой схемы гальванометр подбирается так, чтобы он работал в условиях, близких к критическому ускорению.

Для измерения малых токов в цепях с большими сопротивлениями следует брать гальванометр с большой чувствительностью к току, с большим критическим и собственным сопротивлением.

При использовании гальванометра в цепях с малыми сопротивлениями, а также в качестве нулевых устройств схем мостов и потенциометров следует выбирать гальванометры с малым критическим и собственным сопротивлением,

малой чувствительностью к току и большой чувствительностью к напряжению.

Для измерения незначительных э. д. с. следует применять гальванометры с большой чувствительностью к напряжению.

Для баллистических измерений, например для измерения емкости, следует выбирать гальванометры с большим периодом колебаний — 15—30 с и большим критическим сопротивлением.

По табл. 3-1 и 3-2 можно выбрать наиболее подходящий прибор.

### ж) Гальванометрические усилители

Обычными гальванометрами измеряют весьма малые токи и напряжения. Номинальный ток и номинальное напряжение, например, для гальванометров типа М17 равны:  $I_{\text{ном}} = 1 \cdot 10^{-9}$  А;  $U_{\text{ном}} = 1 \cdot 10^{-6}$  В.

Если возникает необходимость измерять значительно меньшие токи или напряжения, то вместо гальванометра применяют усилитель постоянного тока (УПТ), на выходе

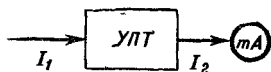


Рис. 3-23. Применение усилителя постоянного тока для повышения чувствительности измерений по току.

которого включен обычный миллиамперметр. Совокупность УПТ и миллиамперметра (рис. 3-23) выполняет роль высокочувствительного гальванометра. Высокая чувствительность схемы объясняется тем, что входное сопротивление УПТ очень велико (до  $10^{15}$  Ом), т. е. потребляемая мощность прибора крайне мала. Рассматриваемый тип

прибора является основным для измерений в цепях с очень большими сопротивлениями.

На рис. 3-24 дана одна из возможных схем работы гальванометрического усилителя. Входной ток  $I_1$  вызывает отклонение светового указателя гальванометра  $\Gamma$  на угол  $\alpha = S_I I_1$ . Перемещение светового луча по светочувствительной поверхности фотоэлемента  $\Phi У$  вызывает появление выходного тока  $I_2 = C_I \alpha$ .

Коэффициент усиления усилителя

$$k_y = \frac{I_2}{I_1} = \frac{C_I \alpha}{\alpha : S_I} = C_I S_I.$$

Коэффициент усиления  $k_y$  может быть равным  $10^5$ — $10^6$ , однако вследствие влияния внешних факторов он сильно

изменяется, и точность прибора будет низкой. Применением более сложных схем можно повысить точность.

Завод «Вибратор» выпускает фотоэлектрические усилители типа Ф117 для усиления постоянных токов и

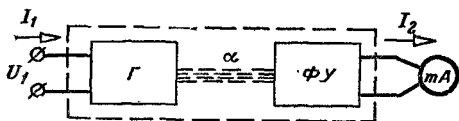


Рис. 3-24. Схема гальванометрического усилителя.

напряжений. Усилитель представляет собой сочетание гальванометра, оптической системы и дифференциального фоторезистора. Усилители изготавливаются с различными коэффициентами усиления — от  $1,4 \cdot 10^4$  до  $3,4 \cdot 10^5$ .

### 3-6. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Приборы выпрямительной системы представляют собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической системы и выпрямителя на полупроводниках. Как известно, вольт-амперную характеристику полупроводникового диода (вентиля) для практических расчетов представляют двумя линейными участками, характеризующимися прямым ( $I_{пр}$ ) и обратным ( $I_{обр}$ ) токами. При таком подходе возможно также характеризовать полупроводниковый диод прямым ( $r_{пр}$ ) и обратным ( $r_{обр}$ ) сопротивлениями.

Коэффициент выпрямления полупроводникового диода  $k_v = I_{пр}/I_{обр} = r_{обр}/r_{пр}$ .

На рис. 3-25, а дана схема с однополупериодным выпрямлением, используемая в амперметрах. Эта схема имеет две ветви (с вентилями  $B_1$  и  $B_2$ ), имеющие равные сопротивления, что обеспечивает одинаковую нагрузку цепи для двух полупериодов переменного тока.

Ток через измерительный механизм идет в течение одного полупериода, что равноценно снижению чувствительности измерительного механизма в 2 раза.

В схеме на рис. 3-25, б измерительный механизм и выпрямитель замкнуты на вторичную обмотку трансформатора, через которую проходит одна полуволна тока, а на рис. 3-25, в дана мостовая схема. В течение одного полу-

периода ток идет по пути *абгв*, в течение второго — по пути *вба*, т. е. через измерительный механизм за период проходят две полуволны тока одного направления (от точки *б* к точке *г*).

Действующий на подвижную рамку измерительного механизма мгновенный вращающий момент  $M = BS\omega t$ .

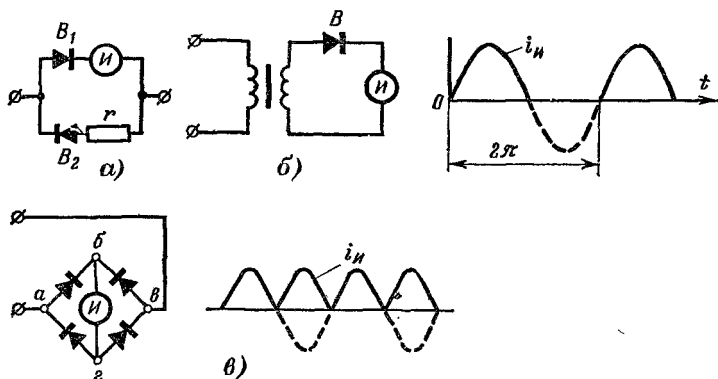


Рис. 3-25. Схемы выпрямителей.

*а* и *б* — схемы с однополупериодным выпрямителем и кривая тока измерительного механизма; *в* — схема с двухполупериодным выпрямлением и кривая тока измерительного механизма.

При двухполупериодном выпрямлении средний за период вращающий момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} M dt = BS\omega \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = BS\omega I_{\text{ср}}.$$

Угол поворота подвижной части, определяемый средним вращающим моментом, выразим так:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{D} I_{\text{ср}}.$$

Так как на шкалах приборов наносятся действующие значения синусоидального тока, то, приняв во внимание, что  $I/I_{\text{ср}} = k_{\phi}$ , получим для двухполупериодной схемы окончательное выражение угла поворота подвижной части:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{Dk_{\phi}} I = I/C_I. \quad (3-19)$$

Таким образом, приборы, проградуированные при синусоидальном токе (коэффициент формы кривой  $k_{\phi} = 1,11$ ),

дают неправильные показания при несинусоидальных токах.

Повышение температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  вызывает уменьшение сопротивления выпрямителей на  $1,5\text{--}4\%$ .

В вольтметрах на малые напряжения изменение сопротивления выпрямителя влияет на сопротивление вольтметра. Для компенсации применяют добавочные резисторы, выполняемые из двух частей: одной из медной и второй

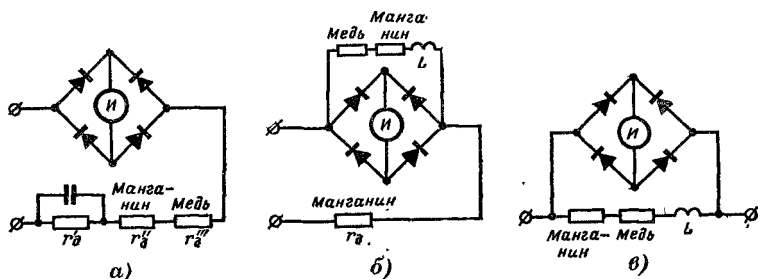


Рис. 3-26. Схема температурной и частотной компенсации у детекторных вольтметров и амперметров.

*а* — на малые напряжения; *б* — на большие напряжения; *в* — на небольшие токи.

из манганиновой проволоки (рис. 3-26, *а*). При увеличении температуры уменьшение сопротивления выпрямителя компенсируется увеличением сопротивления медного добавочного резистора.

В вольтметрах на большие напряжения возможно уменьшение показаний (при повышении температуры) вследствие уменьшения коэффициента выпрямления (возрастает прямое сопротивление диодов). Для компенсации этого влияния применяют шунт (рис. 3-26, *б*), состоящий из двух частей, изготовленных из медной и манганиновой проволок. При повышении температуры возрастают сопротивление шунта и ток в измерительном механизме, что компенсирует уменьшение коэффициента выпрямления. Аналогичная компенсация уменьшения коэффициента выпрямления в амперметрах производится также применением шунтов из меди и манганина (рис. 3-25, *в*).

Собственная емкость вентиля выпрямителя создает при повышенных частотах проводимость для тока, минуя цепь выпрямителя, что приводит к уменьшению показаний прибора.

Уменьшение влияния частоты достигается или шунтированием части добавочного резистора емкостью (рис. 3-26, *a*), или применением шунта с некоторой индуктивностью (рис. 3-26, *б* и *в*).

На основе выпрямительной системы часто создают комбинированные приборы для измерения постоянного и переменного тока и напряжения. Такие приборы содержат все рассмотренные элементы: измерительный механизм, многопредельный шунт, многопредельный добавочный резистор и переключатель.

Приборы с меднозакисными вентилями пригодны для работы при частоте до 2—10 кГц, а с германиевыми вентилями, имеющими малую емкость, — для работы и при более высокой частоте.

Отечественная промышленность выпускает ряд многопредельных ампервольтметров, например Ц-315 для цепей постоянного и переменного тока с частотой от 45 до 1000 Гц; Ц-51 для цепей постоянного тока (класс точности 1) и переменного тока частотой до 10 кГц (класс точности 1,5 и 2,5).

Выпускаются также выпрямительные щитовые приборы на разные номинальные токи и напряжения, например Ц-25, Ц-26, Ц-27, Ц211Т.

Положительные свойства выпрямительных приборов: высокая чувствительность; малая мощность потерь; независимость показаний от частоты (в небольших диапазонах).

Отрицательные свойства: невысокая точность (классы 1,5 и 2,5); зависимость показаний от формы кривой измеряемой величины.

### 3-7. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Термоэлектрический прибор представляет собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма и измерительного термопреобразователя.

Термопреобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя (рис. 3-27). К зажимам измерительного механизма присоединяются свободные концы *a*, *б* термопары, а рабочий конец ее *PK* нагревается измеряемым током, проходящим по нагревателю. Применяются нагреватели, изолированные от термопары или электрически соединенные с ней.

Термо-э. д. с.  $E_{аб}$  вызывает ток в цепи измерительного механизма и поворот его подвижной части; э. д. с.



термопары примерно пропорциональна температуре ее рабочего конца, которая определяется квадратом действующего значения измеряемого тока. Таким образом, угол поворота подвижной части примерно пропорционален квадрату действующего значения тока, идущего через нагреватель.

Для нагревателя применяют константан или платиноиридий, а для термопар — сталь—константан; хромель—константан; золото—палладий—платиноиридий, дающие термо-э. д. с. порядка 50 мкВ при нагреве на 1 °С. Для повышения чувствительности прибора и уменьшения влияния температуры окружающей среды на его показания термопреобразователь помещают в стеклянную колбу, создавая в ней вакуум (вакуумный термоэлемент).

Схема одного из термоэлектрических амперметров дана на рис. 3-28. Измеряемый ток проходит по двум параллельным проводам *A* и *B*. К серединам этих проводов приварены проводники *B'* и *A'*. Таким образом, образуются две термопары (*A'B* и *AB'*), э. д. с. которых вызывает ток в измерительном механизме.

Добавочная термопара *D*, изолированная электрически от колодки, на которой она укреплена, нагревается от этой колодки. Добавочная термо-э. д. с., направленная встречно основным термо-э. д. с., компенсирует их увеличение, вызванное большим повышением температуры рабочих концов по сравнению со свободными концами при длительном прохождении измеряемого тока. В данной схеме в местах расположения рабочих концов термопар измеряемый ток не встречает перехода от одного металла к другому. Поэтому нет дополнительного выделения или поглощения тепла,

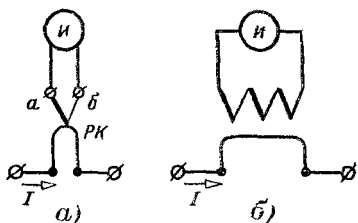


Рис. 3-27. Измерительный механизм с термопреобразователем.

*a* — соединенный с нагревателем (контактный); *b* — изолированный от нагревателя.

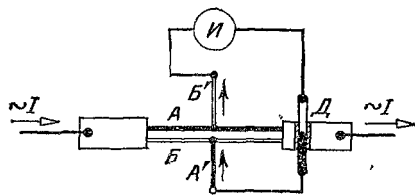


Рис. 3-28. Схема термоэлектрического амперметра.

и направление измеряемого тока не влияет на показания прибора.

Термопреобразователи обладают ничтожной индуктивностью и емкостью, вследствие чего показания термоэлектрических приборов практически не зависят от частоты и формы кривой измеряемой величины. Приборы этой системы широко применяются для измерения тока и напряжения в цепях высокой частоты.

Недостатками термоэлектрических приборов являются невысокая точность и чувствительность к перегрузкам (токам) вследствие работы нагревателя при температурах, близких к предельным, а также значительная мощность потерь из-за низкого к. п. д. термопреобразователя.

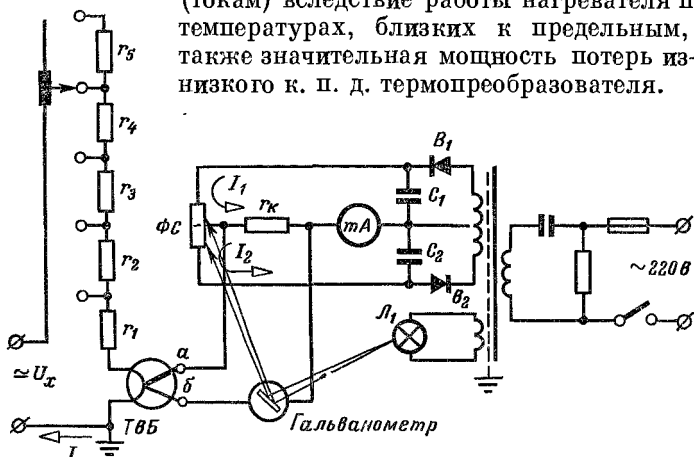


Рис. 3-29. Принципиальная схема термовольметра с фотокомпенсационным усилителем.

Завод «Вибратор» выпускает серию термоприборов для измерения в цепях постоянного и переменного тока с частотой до  $2 \cdot 10^7$  Гц, например термомиллиамперметр Т-15 на номинальные токи  $I_n = 5 \div 300$  мА, класс точности 1; термоамперметр Т-14 на ток  $I_n = 4 \div 60$  А, класс точности 4; термовольтамперметр Т-16 на напряжение  $U_n = 0,75 \div 60$  В, класс точности 1,5 и др.

В термовольметре Т-17 (рис. 3-29) применение вакуумного термопреобразователя ТВБ на 1 мА и фотокомпенсационного усилителя с пределом 40 мкВ позволило значительно уменьшить ток в нагревателе, увеличить входное сопротивление до 10 кОм на 1 В и увеличить перегрузочную способность. Рассмотрим работу прибора.

Ток  $I$  в нагревателе  $TBB$  пропорционален измеряемому напряжению  $U_x$ . Различным номинальным напряжениям соответствуют добавочные резисторы  $r_1$ ;  $r_1 + r_2$  и т. д. Ток в гальванометре  $G$  зависит от термо-э. д. с.  $E_{аб}$ , а следовательно, и от  $U_x$ .

При  $U_x = 0$  ток в гальванометре  $I_G = 0$ , сопротивления фоторезисторов  $\Phi P$  одинаковы и контурные токи  $I_1$  и  $I_2$ , действующие в диагонали моста встречно, компенсируют друг друга. Показание выходного миллиамперметра  $mA$  равно нулю.

При включении измеряемого напряжения  $U_x$  в гальванометре пойдет ток. Перемещение светового луча, отраженного зеркальцем гальванометра, по поверхностям фоторезисторов вызовет увеличение сопротивления одного фоторезистора и уменьшение другого. Вследствие этого ток  $I_1$  не будет равен току  $I_2$ , и через измеритель  $mA$  пойдет ток, равный их разности. Таким образом, показания миллиамперметра зависят от напряжения  $U_x$ . Сопротивление  $r_k$  является элементом обратной связи, которая обеспечивает стабильность усиления. Через конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  могут проходить переменные составляющие выпрямленных токов  $I_1$  и  $I_2$ .

В термовольтметре Т-17 успешно решена задача получения высокой чувствительности к напряжению при весьма малой мощности потерь. Прибор весьма устойчив к перегрузкам и имеет класс точности 1,0.

Термоэлектрические вольтметры Т-131 и Т-132 представляют собой модернизированные термовольтметры Т-17.

Положительные свойства термоэлектрических приборов: высокая чувствительность, независимость показаний от частоты.

Отрицательные свойства: относительно невысокая точность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, значительная мощность потерь.

### 3-8. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Наименование системы прибора определяется типом измерительного механизма, что относится и к электромагнитным амперметрам и вольтметрам.

Электромагнитные амперметры имеют шкалы со значениями измеряемого тока, проходящего по неподвижной катушке прибора (§ 2-2).

Намагничивающая сила катушки при любом номинальном токе составляет 200—300 А, следовательно, при номинальном токе 5 А прибор имеет 40—60 витков. Электромагнитные амперметры изготавливаются на номинальный ток до 300 А, так как при больших токах могут наблюдаться нагрев обмотки и магнитные влияния подводющих проводов с током. Шунты для расширения предела измерения тока не применяются вследствие большого падения напряжения в катушке (до 400 мВ).

Катушки многопредельных амперметров состоят из двух или четырех секций, которые при помощи переключателя соединяются последовательно, параллельно (рис. 3-30) или группами.

Показания амперметров в слабой степени зависят от частоты, так как индуктивность катушки мала. Эти приборы могут применяться при частотах до 1 500 Гц.

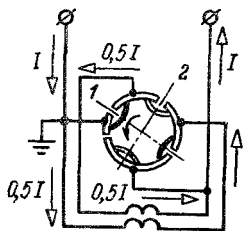


Рис. 3-30. Схема соединения катушек двухпредельного амперметра.

1 — параллельное соединение; 2 — последовательное соединение.

В электромагнитных вольтметрах катушка измерительного механизма соединяется последовательно с безреактивным добавочным резистором и общая цепь вольтметра присоединяется к измеряемому напряжению, значения которого нанесены на шкале прибора.

При постоянном напряжении на зажимах вольтметра его ток

$$I_V = U/r_V = U/(r_K + r_D), \quad (3-20)$$

где  $r_K$  — сопротивление катушки вольтметра.

При неизменном сопротивлении вольтметра, что достигается применением добавочного резистора из манганина, угол поворота подвижной части пропорционален квадрату напряжения на зажимах вольтметра, так как

$$\alpha = kI_V^2 = k \frac{1}{(r_K + r_D)^2} U^2 = k_1 U^2. \quad (3-21)$$

При переменном напряжении на зажимах его ток

$$I_V = U/z_V = U/\sqrt{(r_K + r_D)^2 + (\omega L)^2}. \quad (3-22)$$

Показания вольтметра будут одинаковы при постоянном и переменном напряжениях, если  $r_V = z_V$ , т. е. при  $r_D$ ,

настолько большим по сравнению с  $\omega L$ , что в выражении (3-22) членом  $\omega L$  можно пренебречь. Таким образом, добавочный резистор служит не только для расширения пределов измерения и компенсации влияния температуры, что было показано выше, в § 3-3, но и для компенсации влияния частоты на показания вольтметра.

Вольтметры изготавливаются на различные номинальные напряжения  $U_{VH}$  и токи  $I_{VH}$ . Так, при  $U_{VH} = 150 \div 600$  В  $I_{VH} = 25 \div 50$  мА, а при  $U_{VH} = 30 \div 1,5$  В ток  $I_{VH} = 100 \div 200$  мА.

Показания вольтметров в большей степени зависят от частоты вследствие больших значений индуктивности катушки, и поэтому они могут применяться при частоте, не превышающей 100—200 Гц.

Применение сердечников из пермаллоя повышает точность электромагнитных приборов за счет уменьшения погрешностей от гистерезиса и вихревых токов.

Отечественная промышленность, кроме технических амперметров и вольтметров классов 1,5 и 2,5, выпускает и переносные двух-, трех- и четырехпредельные электромагнитные амперметры и вольтметры класса точности 0,5.

Положительные свойства электромагнитных приборов: простота конструкции, пригодность для постоянного и переменного тока, устойчивость к перегрузкам.

Отрицательные свойства: зависимость показаний от внешних магнитных полей, значительная мощность потерь, неравномерность шкалы.

### 3-9. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМ

Электродинамические амперметры и вольтметры имеют измерительный механизм системы того же названия (§ 2-3).

Подвижная катушка измерительного механизма должна быть легкой (для уменьшения погрешности от трения) и, следовательно, изготавливаться из провода малого сечения, рассчитанного обычно на ток 30—60 мА. Неподвижная катушка, масса которой не влияет на погрешность прибора, выполняется из провода, сечение которого определяется номинальным током прибора, имеющим значение от нескольких миллиампер до 5 А и выше. Неподвижная катушка может состоять из нескольких переключаемых секций (рис. 3-30).

При последовательном соединении катушек (рис. 3-31, а) в цепи с постоянным напряжением тока в катушках  $I_1 = I_2 = I$  и подвижная часть повернется на угол

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 = k_3 I^2. \quad (3-23)$$

При той же схеме соединения в цепи с переменным напряжением мгновенные и действующие значения токов в катушках одинаковы и отсутствует сдвиг по фазе ( $\psi = 0$ ), поэтому угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 \cos \psi = k_3 I^2. \quad (3-24)$$

В амперметрах (рис. 3-31, б) вследствие применения добавочных резисторов ( $r_{д1}$  и  $r_{д2}$ ) из манганина сопротивления параллельных ветвей  $r_1$  и  $r_2$  практически неизменны.

В цепи с постоянным напряжением ток каждой из ветвей прибора (рис. 3-31, б) пропорционален измеряемому

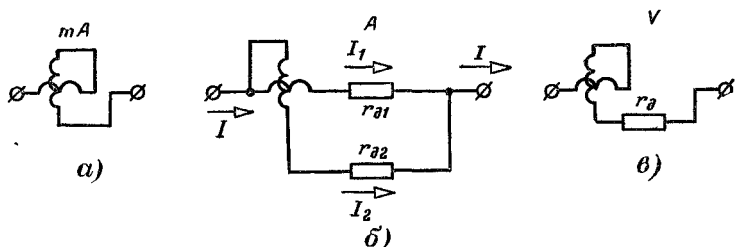


Рис. 3-31. Схема соединения катушек.

а — электродинамического миллиамперметра; б — амперметра; в — вольтметра.

току, так как

$$I_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2} I = k' I \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{r_1}{r_1 + r_2} I = k'' I,$$

Угол поворота подвижной части амперметра

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 = k_4 I^2.$$

Используя схему (рис. 3-31, б) для цепи с переменным напряжением, следует отрегулировать добавочные сопротивления ветвей так, чтобы  $x_1/r_1 = x_2/r_2$ . При этом получим токи в ветвях совпадающими по фазе и угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 \cos \psi = k_3 k' I k'' I = k_4 I^2, \quad (3-25)$$

определяемый так же, как и для постоянного тока.

Показания электродинамических амперметров почти не зависят от частоты, поэтому они могут применяться при частоте до 2 кГц.

В электродинамическом вольтметре катушки и добавочные резисторы соединены последовательно. При его использовании в цепи постоянного тока угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_3 I_V^2 = k_3 (U_V / r_V)^2,$$

а при постоянном сопротивлении  $r_V$

$$\alpha = k_5 U^2. \quad (3-26)$$

В цепи переменного тока угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_3 I_V^2 = k_3 (U_V / z_V)^2.$$

При  $r_d \gg x_d$  сопротивление вольтметра  $z_V = r_V$  и зависимость угла поворота подвижной части вольтметра от напряжения на его зажимах будет одинаковой в цепи переменного и постоянного тока (3-26).

Изменение частоты вызывает изменения сопротивления вольтметра  $z_V = \sqrt{(r_k + r_d)^2 + (\omega L)^2}$  и создает частотную погрешность.

Уменьшение этой погрешности достигается шунтированием части добавочного резистора конденсатором, что и выполняется у более точных приборов.

Отечественная промышленность выпускает много различных типов электродинамических амперметров и вольтметров классов точности 0,1; 0,2; 0,5, например миллиамперметр типа Д528 с номинальным током  $I_n = 1 \div 100$  мА; вольтметр Д523 многопредельный с  $U_n = 1,5 \div 600$  В; амперметры и вольтметры Д533 класса точности 0,2 для постоянного и переменного тока с частотой до 1 кГц; амперметры и вольтметры класса 0,1 типа Д57.

Положительные свойства электродинамических приборов: высокая точность, пригодность для постоянного и переменного тока.

Отрицательные свойства: чувствительность к перегрузкам, чувствительность к внешним магнитным полям, высокая стоимость, значительная мощность потерь.

Ферродинамические амперметры и вольтметры, так же как и электродинамические, имеют вращающий момент, пропорциональный квадрату измеряемой величины. В некоторых приборах эту зависимость делают близкой к линей-

ной, что достигается соответствующим распределением магнитной индукции в воздушном зазоре.

Ферродинамические приборы вследствие большого вращающего момента применяются преимущественно как самопишущие для цепей переменного тока с частотой 50—1 000 Гц. Класс точности их 1,5—2,5.

Положительные свойства ферродинамических приборов: большой вращающий момент, прочность конструкции и надежность в работе, нечувствительность к внешним магнитным полям. Отрицательные свойства: невысокая точность, значительная частотная погрешность.

### 3-10. ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электростатический вольтметр — это измерительный механизм системы того же названия (§ 2-6), на шкале которого нанесены деления, соответствующие значениям напряжения на его зажимах.

Расширение предела измерения напряжения в цепях переменного тока достигается применением добавочных конденсаторов (рис. 3-32, а) или конденсаторных делителей напряжения (рис. 3-32, б).

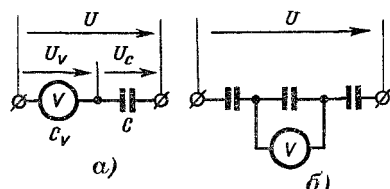


Рис. 3-32. Расширение предела измерения напряжения электростатического вольтметра.

а — добавочным конденсатором; б — конденсаторным делителем напряжения.

Как известно из электротехники, при последовательном соединении конденсаторов их напряжения обратно пропорциональны емкостям, поэтому для цепи (рис. 3-32, а) напряжение

$$U = U_V \frac{C_V + C}{C} = U_V p, \quad (3-27)$$

где  $p$  — множитель, показывающий, во сколько раз напряжение  $U$  больше напряжения  $U_V$ .

Применение конденсатора вызывает изменение характера шкалы и дополнительную погрешность, так как емкость  $C_V$  зависит от угла поворота подвижной части прибора.

При неизменной емкости последовательно соединенных конденсаторов делителя напряжения между измеряемым напряжением  $U$  и напряжением на конденсаторе  $U_V$ , к зажимам которого присоединен вольтметр, будет постоянное соотношение.



Отечественная промышленность выпускает ряд электростатических вольтметров, например вольтметры типа С-50, предназначенные для работы в цепях постоянного и переменного тока частотой от 20 Гц до 10 МГц, пределы измерения их 300 — 3 000 В, входная емкость 4—10 пФ, погрешность 1—2%, вольтметры типа С-100 для измерений высоких напряжений до 25—75 кВ, частота 50 Гц—0,5 МГц, класс точности 1,5.

Положительные свойства электростатических вольтметров: ничтожная мощность потерь, пригодность для постоянного и переменного тока, независимость показаний от частоты и формы кривой измеряемого напряжения, нечувствительность к внешним магнитным полям.

Отрицательные свойства: низкая чувствительность, чувствительность к внешним электрическим полям.

### 3-11. ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Электронные измерительные приборы весьма распространены и используются для измерения напряжения, тока, сопротивления, индуктивности, емкости и других величин.

Вольтметры электронной системы представляют собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической (или электростатической) системы и электронной схемы, предназначенной для преобразования электрических величин.

На рис. 3-33 дана структурная схема электронного вольтметра постоянного тока. На вход усилителя постоянного тока подводится измеряемое напряжение  $U_x$ , а выходной ток  $I$  усилителя измеряется магнитоэлектрическим измерителем  $И$ . Так как усилитель линейный, т. е.  $I \equiv U_x$ , то угол поворота подвижной части измерителя

$$\alpha = kU_x. \quad (3-28)$$

Схема простейшего электронного вольтметра постоянного тока дана на рис. 3-34. Измеряемое напряжение  $U_x$  подводится к сетке триода, а в цепи катода переключателем  $\Pi$  устанавливаются различные сопротивления  $r_k$ , чем обеспе-

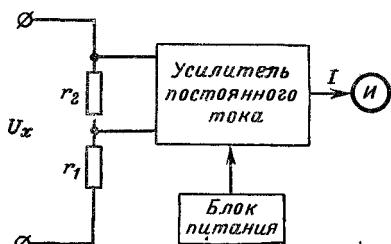


Рис. 3-33. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока.

чивается изменение усиления схемы и предела измерения напряжения.

Начальный ток триода  $I_0$  (при  $U_x = 0$ ) компенсируется встречным током  $I_K$ . Этот ток при  $U_x = 0$  регулируется

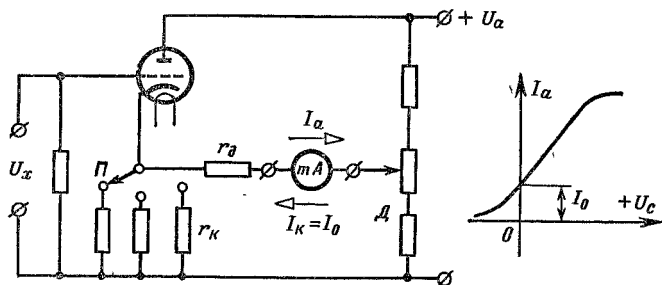


Рис. 3-34. Схема простейшего электронного вольтметра постоянного тока.

движком  $\mathcal{D}$  реостата до значения  $I_K = I_0$ , при котором угол поворота подвижной части измерителя  $\alpha = 0$ .

Мостовая схема электронного вольтметра постоянного тока дана на рис. 3-35. Два плеча моста созданы анодными сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$ , два других — внутренними сопротивлениями триодов. К точкам  $\epsilon$  и  $z$  одной диагонали приложено напряжение источника питания  $U_a$ . К точкам  $a$  и  $b$  второй диагонали моста подключен выходной прибор  $\mathcal{H}$ . Установка прибора на нуль при  $U_x = 0$  производится выравниванием потенциалов анодов движком реостата  $r_p$ .

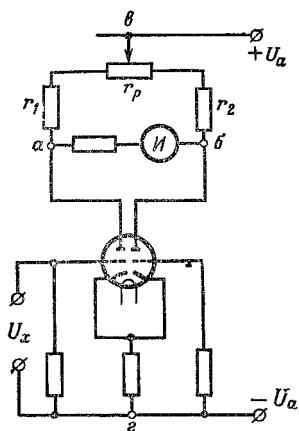


Рис. 3-35. Мостовая схема электронного вольтметра постоянного тока.

При напряжении  $U_x \neq 0$  анодный ток левой половины лампы и потенциал точки  $a$  изменяются, а в измерителе  $\mathcal{H}$  появится ток, являющийся функцией измеряемого напряжения  $U_x$ . Эта схема обеспечивает хорошую точность и устойчивую установку нуля.

На рис. 3-36 даны две структурные схемы электронных вольтметров переменного тока. В первой схеме (рис. 3-36, а)

измеряемое напряжение сначала выпрямляется детектором  $D$ , а затем усиливается в усилителе постоянного тока (УПТ).

Во второй схеме (рис. 3-36, б), наоборот, измеряемое напряжение сначала усиливается в усилителе переменного тока (усилитель напряжения), а затем выпрямляется детектором  $D$ . На выходе той и другой схемы включены магнитоэлектрические измерители.

Первая схема применима для более широкого диапазона частот, но имеет меньшую чувствительность и точность вследствие неустойчивой работы детектора при низких напряжениях. Вторая схема имеет более высокую чувствительность, но более узкий

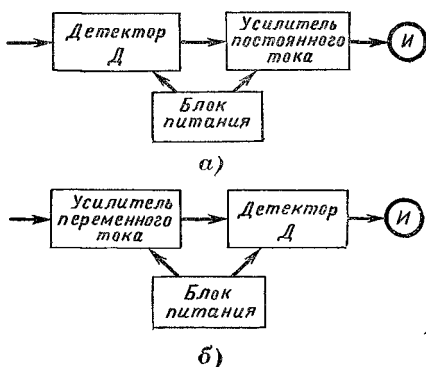


Рис. 3-36. Структурные схемы электронных вольтметров переменного тока.

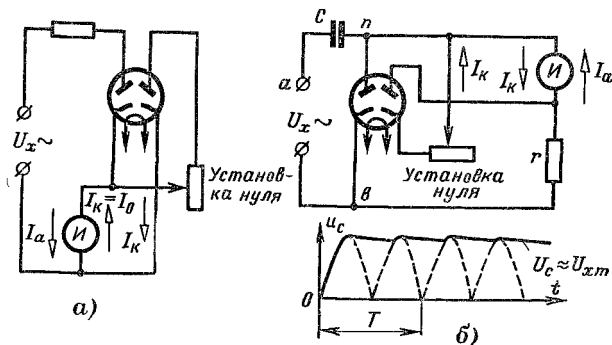


Рис. 3-37. Схемы диодных вольтметров переменного тока.

а — с детектором среднего значения; б — с амплитудным детектором.

диапазон частот, что характерно для усилителей напряжения.

Схемы электронных вольтметров переменного тока, выполненные на двойном диоде, дапы на рис. 3-37.

В первой схеме (рис. 3-37, а) через измерительный механизм ток проходит только при положительной полуволне напряжения  $U_x$ . Вращающий момент и угол поворота подвижной части пропорциональны среднему значению измеряемого напряжения. Так как шкала вольтметра градуируется в действующих значениях при синусоидальной форме кривой, то показания такого вольтметра с детектором среднего значения зависят от формы кривой измеряемого напряжения.

Начальный ток  $I_0$ , идущий через измеритель при  $U_x = 0$ , компенсируется начальным током  $I_K$  второго диода, направление которого в измерителе противоположно току  $I_0$ . Небольшой начальный ток  $I_0$  при замкнутых зажимах вольтметра вызывается тем, что часть электронов, вылетающих из катода, имеет достаточную начальную скорость для достижения анода при нулевом и даже при некотором незначительном отрицательном потенциале его.

Если во второй схеме (рис. 3-37, б) в течение первой четверти периода потенциал  $\phi_a$  выше  $\phi_b$ , то через диод идет ток и конденсатор  $C$  быстро заряжается до амплитудного значения входного напряжения  $U_x$ , так как сопротивление открытого диода мало. Во вторую четверть периода входное напряжение  $u_x$  меньше напряжения на конденсаторе  $u_c$  и последний разряжается. При этом потенциал анода (точка  $n$ ) отрицателен по отношению к катоду (точка  $e$ ), таким образом, диод заперт и конденсатор разряжается через измеритель  $I$  и относительно большое сопротивление  $r$ , при котором процесс разрядки замедлен.

Если выполнено условие  $Cr \gg T$ , то за время полупериода  $T/2$  напряжение на конденсаторе изменится очень незначительно (рис. 3-37, б). Таким образом, показания вольтметра (измерительного механизма) будут пропорциональны амплитудному значению измеряемого напряжения  $U_{mx}$ .

Шкала вольтметра градуируется в действующих значениях синусоидального напряжения  $U$ , тогда при любой форме кривой измеряемого напряжения  $U_m = U/0,707$ .

В этой схеме, так же как и в предыдущей, начальный ток диода  $I_0$  при  $U_x = 0$  компенсируется начальным током  $I_K$  второго диода.

Схема электронного вольтметра, в которой триод используется как выпрямитель и усилитель, дана на рис. 3-38. Измеряемое напряжение  $U_x$  подводится к сетке триода, начальный потенциал которой  $U_x = 0$  можно изменить делителем напряжения  $r_c$ .

Зависимость анодного тока  $i_a$  от напряжения на сетке лампы  $u_c$  дана на рис. 3-39.

При  $U_x = 0$  сетка лампы относительно катода имеет отрицательный потенциал  $U_{c0}$  и в анодной цепи проходит начальный ток  $I_{a0}$ , а стрелка измерителя установится на «условный нуль» шкалы. После включения измеряемого напряжения (кривая 1—2—3—4—5 на рис. 5-39) напряжение на сетке будет равно сумме  $U_{c0}$  и  $u_x$  (кривая 1'—2'—3'—4'—5').

Находя по кривой  $i_a = f(u_c)$  анодный ток, соответствующий различным значениям сеточного напряжения  $u_c = f(t)$ , нетрудно по-

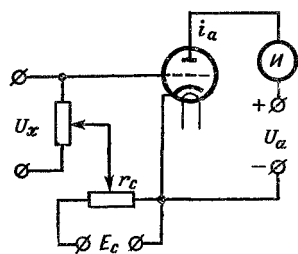


Рис. 3-38. Схема электронного вольтметра с квадратичной характеристикой.

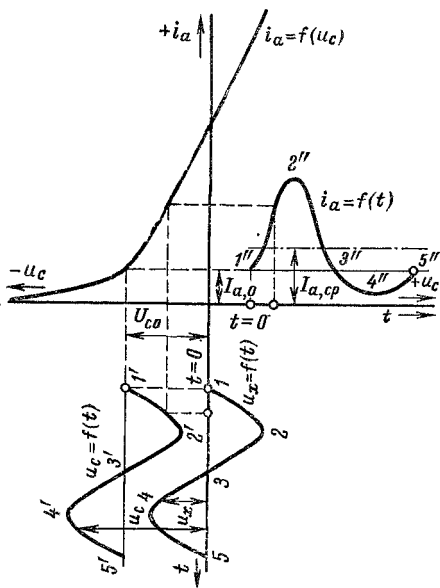


Рис. 3-39. Характеристика электронной лампы и кривая тока измерительного механизма.

строить кривую анодного тока в зависимости от времени  $i_a = f(t)$  (кривая 1''—2''—3''—4''—5''). Следовательно, в анодной цепи будет пульсирующий ток, зависящий от измеряемого напряжения. Вследствие нелинейности характеристики триода форма кривой анодного тока  $i_a$  будет несинусоидальной.

Постоянная составляющая анодного тока

$$\Delta I_a = I_{a. \text{cp}} - I_{a0}$$

независимо от формы кривой входного измеряемого напря-

жения может быть получена примерно пропорциональной квадрату действующего значения напряжения, т. е.

$$\Delta I_a = kU_x^2,$$

если соответствующим образом выбрать характеристику триода  $i_a = f(u_c)$  и начальное сеточное смещение  $U_{co}$ . Таким образом, шкала прибора имеет квадратичный характер.

Так как при  $U_x = 0$  анодный ток лампы не равен нулю, то обычно через выходной прибор пропускают ток компенсации  $i_k = I_{a0}$ , направленный встречно.

Электронные вольтметры, имеющие высокую чувствительность и большое входное сопротивление, широко применяются для измерений в цепях малой мощности, например для радиотехнических измерений.

Отечественная промышленность выпускает большое число различных электронных приборов, например вольтметры типа Ф-505 класса точности 1,5 при номинальной области частот 45—5 000 Гц и многопредельные высокочувствительные миллиамперметры типа Ф-58. Они предназначены для измерений действующих значений напряжений и токов в цепях переменного тока при несинусоидальной форме кривых. Приборы представляют собой двухкаскадный усилитель напряжения низкой частоты, на выходе которого включен электростатический измеритель.

Положительные свойства электронных вольтметров: высокая чувствительность, независимость показаний от частоты и формы кривой измеряемой величины, ничтожная мощность потерь.

Отрицательные свойства: невысокая точность (класс точности 1—2,5), наличие вспомогательного источника питания, необходимость новой градуировки при замене ламп.

## Глава четвертая

### ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

#### 4-1. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительные трансформаторы, представляющие собой измерительные преобразователи, делят на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Транс-

Форматоры напряжения понижают измеряемое напряжение в заданное число раз. Получаемое низкое напряжение, не превышающее обычно 100 В, подводится к вольтметрам, параллельным цепям ваттметров, счетчиков и других измерительных приборов.

Используя трансформаторы напряжения, с одной стороны, получаем возможность применения низковольтных приборов для измерений в цепях высокого напряжения, а с другой — обеспечиваем безопасность обслуживания высоковольтных установок.

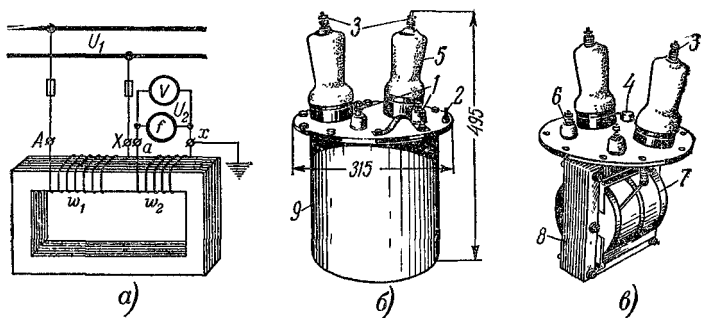


Рис. 4-1. Трансформатор напряжения.

*а* — устройство трансформатора напряжения и схема его включения; *б* — общий вид трансформатора напряжения типа НОМ-10 для внутренней установки на напряжение 10 кВ; *в* — вид выемной части НОМ-10; 1 — зажимы для присоединения проводов низкого напряжения (н. н.); 2 — болт заземления; 3 — зажимы для присоединения проводов высокого напряжения (в. н.); 4 — пробка отверстия для заливки масла; 5 — изоляторы в. н.; 6 — изоляторы н. н.; 7 — обмотка в. н.; 8 — магнитопровод; 9 — бак с маслом.

Устройство трансформатора напряжения (рис. 4-1) аналогично устройству силового трансформатора. Трансформатор напряжения состоит из замкнутого магнитопровода, набранного из листовой трансформаторной стали, и двух изолированных обмоток — первичной и вторичной с числами витков  $w_1$  и  $w_2$ . Первичная обмотка трансформатора присоединяется к сети с измеряемым напряжением; к зажимам вторичной обмотки подключаются соединенные параллельно вольтметры и параллельные цепи других приборов.

Для работы трансформатора напряжения характерно незначительное изменение первичного напряжения и большое сопротивление вторичной внешней цепи; таким образом, он работает в условиях, близких к холостому ходу.

Отношение действительного значения первичного напряжения  $U_1$  к действительному значению вторичного напряжения  $U_2$  называется действительным коэффициентом трансформации трансформатора напряжения  $k = U_1/U_2$ . Зная этот коэффициент и измерив вторичное

напряжение вольтметром, можно определить первичное напряжение  $U_1 = kU_2$ .

Однако действительный коэффициент трансформации обычно не известен, так как он зависит от режима работы трансформатора, т. е. от измеряемого напряжения, от значения и характера нагрузки и от частоты переменного тока. Вследствие этого приближенно измеряемое напряжение  $U_1$  находят по формуле

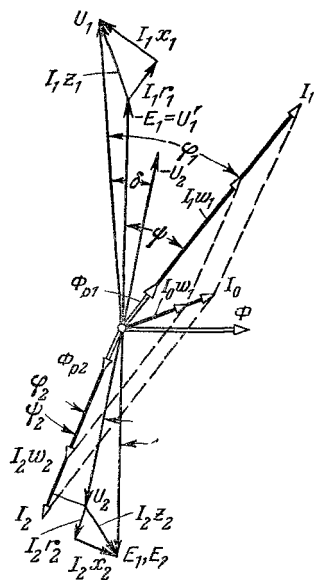
$$U'_1 = k_H U_2, \quad (4-1)$$

где  $k_H = U_{H1}/U_{H2}$  — номинальный коэффициент трансформации, равный отношению номинального первичного напряжения к номинальному вторичному напряжению, дается заводом на щитке трансформатора.

Согласно ГОСТ напряжением  $U_{H2} = 100$  В или  $100\sqrt{3}$  В.

Погрешность при измерении напряжения, вызванная

Рис. 4-2. Векторная диаграмма трансформатора напряжения, построенная в предположении, что  $w_1 = w_2$ .



применением трансформатора,

$$\begin{aligned} \gamma_U &= \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{U_2 k_H - U_2 k}{U_2 k} \cdot 100\% = \\ &= \frac{k_H - k}{k} \cdot 100\% = \gamma_k, \end{aligned} \quad (4-2)$$

где  $\gamma_k = \gamma_U$  — погрешность в коэффициенте трансформации или погрешность по напряжению.

Угол сдвига  $\delta$  между вектором первичного напряжения  $U_1$  и повернутым на  $180^\circ$  вектором вторичного напряжения  $U_2$  называется угловой погрешностью трансформатора напряжения (рис. 4-2). Она положительна, если повернутый вектор  $U_2$  опережает по фазе вектор  $U_1$ .



С угловой погрешностью необходимо считаться при совместной работе трансформатора напряжения с приборами, показания которых зависят от фазы напряжения, например фазометрами, ваттметрами, счетчиками и т. п.

Погрешности трансформатора напряжения обуславливаются падениями напряжений в его обмотках. Действительно, допустив падения напряжений в обмотках равными нулю [ $I(r + jx) = 0$ ], получим на диаграмме (рис. 4-2)  $E_1 = U_1$  и  $E_2 = U_2$  и, следовательно,

$$w_1/w_2 = E_1/E_2 = U_1/U_2 = U_{н1}/U_{н2} = k = k_{н}.$$

В этих условиях погрешности по напряжению и угловая равны нулю при всех режимах работы, так как равны

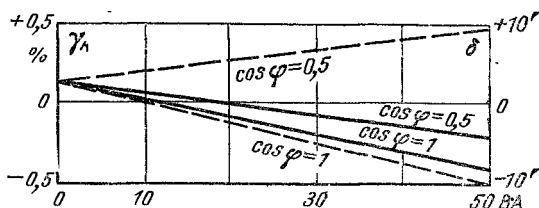


Рис. 4-3. Кривые погрешностей в коэффициенте трансформации (силосные) и угловых погрешностей (пунктирные) трансформатора напряжения в зависимости от нагрузки вторичной цепи при разных  $\cos \varphi$ .

по модулям и совпадают по направлению векторы  $U_1$  и  $E_1$ , а также  $U_2$  и  $E_2$ .

Погрешности трансформатора обусловлены падениями напряжений в его обмотках, следовательно, те и другие зависят от одних и тех же факторов: сопротивлений обмоток трансформаторов  $r_1, r_2, x_1, x_2$ ; значения и характера нагрузки вторичной цепи (рис. 4-3); тока холостого хода; величины и фазы тока вторичной цепи; первичного напряжения и частоты тока (рис. 4-4).

Уменьшение активных сопротивлений обмоток достигается применением проводов сравнительно большого сечения.

Уменьшение реактивных сопротивлений обеспечивается применением малых значений магнитной индукции (0,6—1 Т); применением лучших сортов стали, что, кроме того, приводит к уменьшению тока холостого хода и уменьшению потерь в магнитопроводе.

Наибольшая мощность, которую можно получить от трансформатора без увеличения погрешностей выше допустимых для его класса точности, называется номинальной полной мощностью трансформатора. Она указана заводом на щитке трансформатора. При известном номинальном напряжении трансформатора допустимую нагрузку его можно характеризовать не только номинальной полной мощностью, но и номинальным вторичным током или номинальным сопротивлением вторичной цепи, так как эти величины связаны между собой соотношением

$$S_H = I_{H2} U_{H2} = U_{H2}^2 / z_{H2} = I_{H2}^2 z_{H2}.$$

Количество приборов, которое можно подключить к трансформатору напряжения, определяется их суммар-

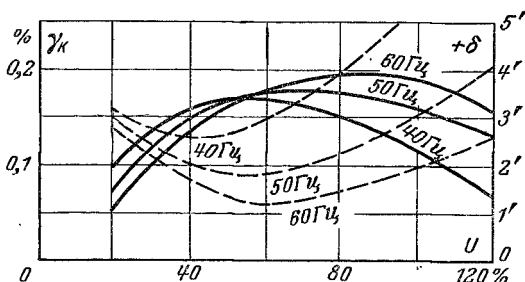


Рис. 4-4. Кривые погрешностей в коэффициенте трансформации (сплошные) и угловых погрешностей (пунктирные) трансформатора напряжения в зависимости от приложенного напряжения при разных частотах.

ной номинальной полной мощностью, которая не должна превышать номинальную мощность трансформатора при номинальном напряжении.

**Пример 4-1.** Подсчитать, используя данные табл. 1-6, можно ли к трансформатору напряжения номинальной мощностью 25 В · А подключить: 1) электромагнитный вольтметр; 2) параллельную обмотку ферродинамического ваттметра; 3) параллельную обмотку фазометра; 4) параллельную обмотку индукционного счетчика.

Найдя в табл. 1-6 мощности перечисленных приборов и сложив их, получим нагрузку трансформатора:

$$S = 6 + 6 + 8 + 4 = 24 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Так как полученная мощность меньше номинальной мощности трансформатора, то подключение указанных приборов к данному трансформатору допустимо.

Номинальную мощность трансформатора напряжения не следует смешивать с его максимальной мощностью — наибольшей полной мощностью, которую можно получить от трансформатора, исходя из условий допустимого его нагревания.

Схема устройства и включения трехфазного трансформатора напряжения дана на рис. 4-5. На трех стержнях магнитопровода располагаются три первичные и три вторичные обмотки. Первичные обмотки присоединяются к трехфазной цепи, к зажимам вторичных обмоток присоединяются измерительные приборы.

Сказанное выше относительно однофазных трансформаторов относится и к трехфазным.

Для безопасности обслуживающего персонала один зажим вторичной цепи трансформатора и его металлический корпус всегда заземляются (рис. 4-1 и 4-5). При отсутствии заземления и повреждении изоляции первичной обмотки вторичная обмотка и подключенные к ней приборы окажутся под высоким потенциалом, что недопустимо.

Согласно ГОСТ 1983-67 и 9032-69 трансформаторы напряжения по точности делят на классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1 и 3 (табл. 4-1).

Номинальные данные трансформаторов напряжения даны в табл. 4-2.

По роду изоляции трансформаторы напряжения делят на сухие (для напряжений до 3 кВ) и трансформаторы с заливкой маслом или изолирующей массой (для напряжении 3 кВ и выше).

Массы меди и стали трансформатора напряжения увеличиваются примерно пропорционально квадрату его номинального напряжения. Мощность трансформатора с увеличением номинального напряжения увеличивается, оставаясь неиспользованной, так как это увеличение обуславливается условиями электрической и механической прочности. Вследствие этого при напряжении 100 кВ и выше применяют трансформаторы с более рациональным

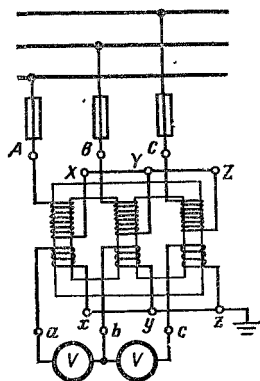


Рис. 4-5. Схема устройства и включения трехфазного трансформатора напряжения.

## Классы точности трансформаторов напряжения

Класс точности трансформаторов напряжения	Максимальные погрешности		Условия нагрузки
	По напряжению, %	Угловая, мин	
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 10$	1. При напряжении $0,9 U_{\text{нн}} - 1,1 U_{\text{нн}}$
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 20$	2. При отдаваемой вторичной обмоткой мощности $0,25 (U_1/U_{\text{нн}})^2 S_{\text{н}} - (U_1/U_{\text{нн}})^2 S_{\text{н}}$ (см. табл. 4-2)
1	$\pm 1,0$	$\pm 40$	3. При частоте 50 Гц
3	$\pm 3,0$	Не стандартизуется	4. При $\cos \varphi$ нагрузки, равном 0,8

Таблица 4-2

## Номинальные данные трансформаторов напряжения

Трансформаторы	Номинальное напряжение $U_{\text{нн}}$ , В	Номинальная мощность $S_{\text{н}}$ , В · А			Максимальная мощность трансформатора, В · А
		В классе точности 0,5	В классе точности 1	В классе точности 3	
Однофазные двух-обмоточные	380, 500	25	40	100	200
	3 000	30	50	120	240
	6 000	50	80	200	400
	10 000, 15 000	80	150	320	640
	35 000	150	250	600	1 200
Трехфазные двух-обмоточные	380, 500	50	80	200	400
	3 000	—	150	320	640
	6 000	80	—	—	—
	10 000, 15 000	120	200	480	960

использованием материалов. Одним из таких типов является каскадный трансформатор напряжения, в котором напряжение распределяется равномерно на несколько элементов. Например, при каскаде с тремя элементами

и номинальном напряжении 110 кВ каждый элемент каскада имеет номинальное напряжение  $110 \text{ кВ}/3 \approx 37 \text{ кВ}$ . Считая массу трансформаторов пропорциональной квадрату напряжения, получаем массу трех трансформаторов по 37 кВ — в 3 раза меньшую массы одного трансформатора на 110 кВ.

Отечественная промышленность, кроме различных типов промышленных трансформаторов, изготавливает лабораторные трансформаторы с несколькими номинальными первичными и вторичными напряжениями, например трансформатор напряжения типа УТН-1 класса точности 0,2 при  $U_{н1} = 500 \div 380 \text{ В}$  (или  $380 \text{ В}/\sqrt{3}$ ) и при  $U_{н2} = 100 \div 100/\sqrt{3} \text{ В}$  (или  $100 \text{ В}/3$ ). К этой же группе относится трансформатор напряжения типа И-50 класса точности 0,2 с  $U_{н1}$ , равным 15—10—6—3 кВ, и  $U_{н2}$ , равным 100 В и  $100 \text{ В}/\sqrt{3}$ .

#### 4.2. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

Трансформаторы тока предназначены для преобразования измеряемых переменных токов в относительно малые токи, не превышающие обычно 5 А. Во вторичную цепь трансформатора тока включают амперметры, последовательные обмотки ваттметров, счетчиков и других приборов.

В цепях высокого напряжения при помощи трансформаторов тока измерительные приборы изолируются от проводов высокого напряжения. Таким образом, с одной стороны, достигается возможность применения низковольтных измерительных приборов, с другой стороны, обеспечивается безопасность обслуживания измерительной установки.

Трансформатор тока состоит из стального магнитопровода и двух изолированных обмоток (рис. 4-6). Первичная обмотка, имеющая меньшее число витков, включается в рассечку провода с измеряемым током. Вторичная обмотка с большим числом витков замыкается на амперметр и токовые обмотки измерительных

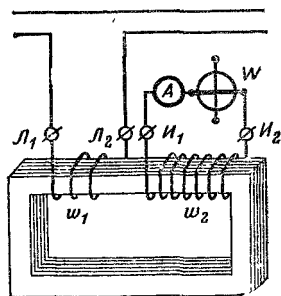


Рис. 4-6. Устройство трансформатора тока и схема его включения.

приборов, соединенные последовательно, так что сопротивление вторичной внешней цепи мало и обычно не превышает 1—2 Ом.

Принцип работы трансформатора тока тот же, что и трансформатора напряжения, но в отличие от последнего он работает в условиях, близких к короткому замыканию. Кроме того, первичный ток трансформатора тока не зависит

от сопротивления его вторичной цепи. При работе этот ток может изменяться от нуля до номинального, а при коротких замыканиях в цепи может превосходить номинальный в десятки раз.

По векторной диаграмме (рис. 4-7) запишем уравнение намагничивающих сил (н. с.):

$$I_0 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2, \quad (4-3)$$

где  $I_0 w_1$  — результирующая н. с., возбуждающая магнитный поток в магнитопроводе трансформатора.

Намагничивающая сила  $I_0 w_1$  создается намагничивающим током  $I_0$ , практически равным току холостого хода трансформатора. Под током холостого хода следует понимать ток первичной обмотки, который при разомкнутой вторичной обмотке создает в магнитопроводе номинальный для данного режима магнитный поток.

При нормальном режиме работы трансформатора тока н. с.  $I_0 w_1$  и магнитный поток в магнитопроводе незначительны, так как этот поток должен наводить во вторичной обмотке незначительную э. д. с., необходимую для покрытия малых активных и реактивных потерь вторичной цепи — трансформатора.

Увеличение сопротивления вторичной цепи при неизменном токе  $I_1$  приводит к уменьшению тока  $I_2$  и н. с.  $I_2 w_2$ . При этом по уравнению (4-3) возрастет н. с.  $I_0 w_1$  и

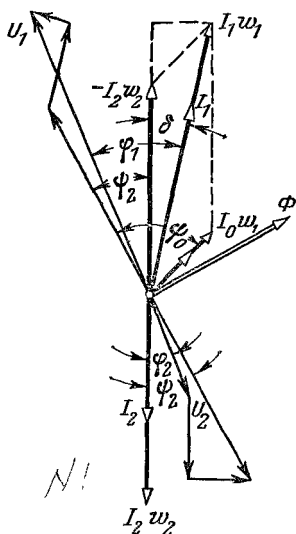


Рис. 4-7. Векторная диаграмма трансформатора тока.

создаваемый магнитный поток. В пределе при размыкании вторичной цепи ( $z_2 = \infty; I_2 = 0$ ) имеем  $I_2 w_2 = 0$ , а  $I_0 w_1 = I_1 w_1$ .

При нормальном режиме работы трансформатора тока результирующая н. с. незначительна по сравнению с первичной н. с., поэтому магнитный поток, который установится в магнитопроводе при размыкании вторичной цепи, будет во много раз больше нормального магнитного потока, на который рассчитан магнитопровод трансформатора. Значительное увеличение магнитного потока и магнитной индукции приводит к резкому возрастанию потерь в стали, что может вызвать чрезмерный нагрев магнитопровода трансформатора. Кроме того, увеличенный магнитный поток будет индуцировать во вторичной обмотке э. д. с., достигающую опасных значений (до 2 кВ и выше). Из сказанного следует, что вторичная цепь работающего трансформатора тока всегда должна быть замкнута на токовые обмотки приборов или накоротко.

Отношение действительного значения первичного тока  $I_1$  к действительному значению вторичного тока  $I_2$  называется действительным коэффициентом трансформации трансформатора тока, т. е.  $k = I_1/I_2$ . При известном коэффициенте  $k$ , измерив вторичный ток амперметром, определяем первичный ток:  $I_1 = kI_2$ .

Действительный коэффициент трансформации обычно не известен, так как он зависит от режима работы трансформатора тока, т. е. от измеряемого тока, значения и характера сопротивления вторичной внешней цепи и от частоты тока. Вследствие этого пользуются даваемым заводом на щитке трансформатора номинальным коэффициентом трансформации  $k_H = I_{H1}/I_{H2}$ , представляющим отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току трансформатора. Зная  $k_H$ , найдем приближенное значение измеряемого тока:  $I_1 = k_H I_2$ .

Погрешность при измерении тока, вызванная применением трансформатора,

$$\gamma_I = \frac{I_1' - I_1}{I_1} \cdot 100\% = \frac{k_H I_2 - k_2 I_2}{k I_2} \cdot 100\% = \frac{k_H - k}{k} \cdot 100\% = \gamma_K, \quad (4-4)$$

где  $\gamma_K = \gamma_I$  — погрешность в коэффициенте трансформации или погрешность по току.

Уравнение (4-4) аналогично (4-2), поэтому все сказанное ранее о погрешности измерения напряжения  $\gamma_U$  относится и к погрешности измерения тока  $\gamma_I$ .

Погрешности трансформатора тока обуславливаются током холостого хода или результирующей н. с.  $I_0 w_1$ . Если ток холостого хода равен нулю  $I_0 = 0$ , то н. с.  $I_0 w_1 = 0$  и первичная н. с. равна вторичной:  $I_1 w_1 = I_2 w_2$ , откуда:

1) погрешность по току равна нулю при всех режимах работы трансформатора, так как

$$w_2/w_1 = I_1/I_2 = I_{H1}/I_{H2} = k = k_H;$$

2) угловая погрешность также равна нулю, так как вектор тока  $I_1$  совпадает с повернутым на  $180^\circ$  вектором тока  $I_2$ .

Погрешности трансформатора тока и результирующая н. с. зависят от одних и тех же факторов: от магнитного сопротивления магнитопровода; от значения и характера сопротивления вторичной внешней цепи трансформатора ( $z_2$  и  $\cos \varphi_2$ ); от

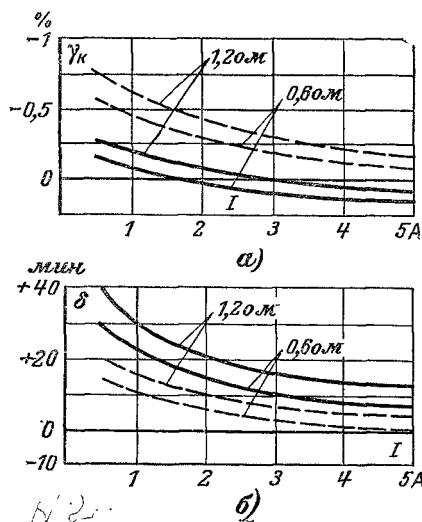


Рис. 4-8. Кривые погрешностей трансформатора тока в зависимости от вторичного тока при различных сопротивлениях вторичной внешней цепи (сплошные — при  $\cos \varphi = 1$ ; пунктирные — при  $\cos \varphi = 0,6$ ).

а — погрешности в коэффициенте трансформации; б — угловые погрешности.

вторичного тока трансформатора (рис. 4-8); от частоты тока.

Из векторной диаграммы (рис. 4-7) видно, что при малых значениях угла  $\delta$  вектор н. с.  $I_1 w_1$  можно считать равным проекции его на направление вектора н. с.  $I_2 w_2$ , следовательно,

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)$$

или

$$I_1 = [I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)]/w_1,$$

откуда действительный коэффициент трансформации трансформатора

$$k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} + \frac{I_0 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2}. \quad (4-5)$$



Погрешность по току (4-4)

$$\gamma_I = \frac{k_H - k}{k} \cdot 100\% \approx \frac{k_H - k}{k_H} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{k}{k_H}\right) \cdot 100\%.$$

Заменив в последней формуле  $k$  его выражением из (4-5), получим:

$$\begin{aligned} \gamma_I &= \left[ 1 - \frac{w_2}{w_1 k_H} - \frac{I_0 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 k_H} \right] \cdot 100\% = \\ &= \left[ C - \frac{I_0 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 k_H} \right] \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (4-6)$$

Из той же векторной диаграммы (рис. 4-7) можно написать выражение для тангенса угла  $\delta$ , а вследствие малости угла и для самого угла:

$$\operatorname{tg} \delta = \delta = \frac{I_0 w_1 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 w_2 + I_0 w_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)}.$$

Величина  $I_0 w_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)$  мала по сравнению с  $I_2 w_2$ , поэтому можно написать:

$$\delta \approx \frac{I_0 w_1 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 w_2} = \frac{I_0 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 \frac{w_2}{w_1}} = \frac{I_0 \cos \psi_2}{I_2 \frac{w_2}{w_1}}; \quad (4-7)$$

так как  $\psi_0 \approx 90^\circ$ , то  $\sin(\psi_0 - \psi_2) = \cos \psi_2$ .

Формулы (4-6) и (4-7) показывают, что погрешность по току и угловая погрешность зависят от одних и тех же величин.

При  $w_2/w_1 = k$  получим  $C = 0$ , и погрешность по току (4-6) будет отрицательной при всех значениях  $k_2$ . Отношение  $w_2/w_1$  выбирают меньше  $k_H$  с таким расчетом, чтобы при некотором значении тока  $I_2$  получить погрешность равной нулю. Тогда при больших токах погрешность будет положительной, а при меньших — отрицательной.

Погрешности трансформатора тока увеличиваются с ростом сопротивления вторичной внешней цепи его. Поэтому для каждого трансформатора заводом указывается его номинальное сопротивление — номинальная вторичная нагрузка в омах или номинальная мощность в вольт-амперах.

Номинальной нагрузкой трансформатора тока называется наибольшее сопротивление, на которое можно замыкать его вторичную обмотку, не вызывая увеличения погрешностей выше допустимых для соответствующего класса точности.

Номинальная нагрузка и номинальная мощность трансформатора тока связаны между собой соотношением

$$S_H = I_{H2}^2 Z_H.$$

Вторичный номинальный ток у большинства трансформаторов тока равен 5 А.

Количество приборов, которое можно присоединить к трансформатору, определяется суммарным сопротивлением приборов и соединительных проводов, которое не должно превышать номинальную нагрузку трансформатора.

**Пример 4-2.** Проверить возможность подключения к трансформатору с номинальной нагрузкой 0,6 Ом электромагнитного амперметра, последовательной обмотки ферродинамического ваттметра, если соединительные медные провода имеют длину 20 м и сечение 4 мм<sup>2</sup>.

Сопротивление соединительных проводов

$$r_{с. пр} = \rho l / S = 0,0175 \cdot 20 / 4 \approx 0,09 \text{ Ом.}$$

Сопротивление амперметра (из табл. 1-6) 0,2 Ом.

Сопротивление обмотки ваттметра (из табл. 1-6) 0,2 Ом.

Полное сопротивление вторичной внешней цепи трансформатора тока определяется геометрической суммой полных сопротивлений последовательных обмоток, присоединяемых приборов и соединительных проводов. При приближенных подсчетах эти сопротивления складываются арифметически, т. е. пренебрегают сравнительно малыми реактивными сопротивлениями обмоток. При этом сопротивление вторичной внешней цепи

$$z_2 = 0,09 + 0,2 + 0,2 = 0,49 \text{ Ом.}$$

Такая нагрузка меньше номинальной для данного трансформатора и поэтому допустима.

При неизменной нагрузке  $z_2$  и уменьшении измеряемого тока погрешности трансформатора увеличиваются [рис. 4-8 и формулы (4-6) и (4-7)], это является следствием относительного увеличения намагничивающего тока.

Уменьшение погрешностей трансформаторов достигается применением магнитопроводов из дорогостоящих сталей с высокой магнитной проницаемостью или магнитопроводов с увеличенным сечением, что приводит к увеличению массы, размеров и стоимости трансформаторов.

В компенсированных трансформаторах применяется искусственное подмагничивание магнитопровода до значения, при котором материал магнитопровода имеет наибольшую магнитную проницаемость, это обеспечивает относительное уменьшение результирующей н. с.  $I_0 w_1$ , а следовательно, и уменьшение погрешностей.

У одних трансформаторов подмагничивание производится вторичным током при прохождении его по дополнительным обмоткам  $w_3$  и  $w_2''$  (рис. 4-9, а), у других — полем рассеяния. В последнем случае применяется магнитный шунт (рис. 4-9, б), который уменьшает магнитное

сопротивление пути потоков рассеяния, что вызывает увеличение потоков рассеяния и подмагничивание ими магнитопровода трансформатора.

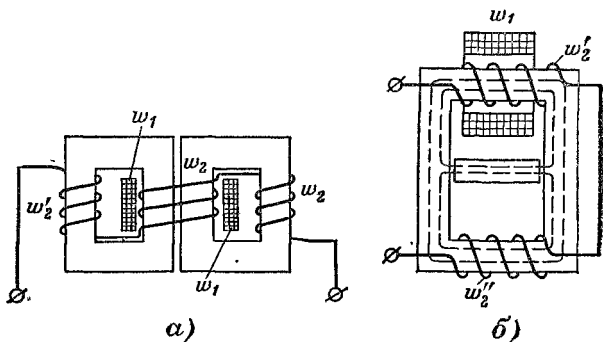


Рис. 4-9. Схемы компенсированного трансформатора тока с дополнительными обмотками (а) и с магнитным шунтом (б).

На рис. 4-10 дан внешний вид компенсированного трансформатора тока типа 0-49У. С левой стороны виден магнитный шунт, имеющий форму скобы, охватывающей первичную обмотку трансформатора.

На рис. 4-11 даны схема и внешний вид универсального трансформатора типа УТТ-5 киевского завода «Точэлектроприбор». Он имеет магнитопровод из пермаллоя и две обмотки: вторичную (зажимы  $I_1, I_2$ ) с номинальным током  $I_{H2} = 5$  А и первичную, состоящую из двух секций с номинальными токами  $I'_{H1} = 15$  А и  $I''_{H1} = 50$  А. При измеряемых токах 100—600 А первичная обмотка создается витками гибкого провода, проходящими через отверстия в трансформаторе. Класс точности трансформатора 0,2.

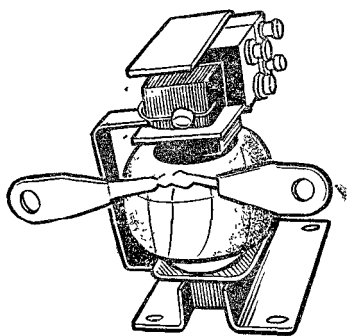


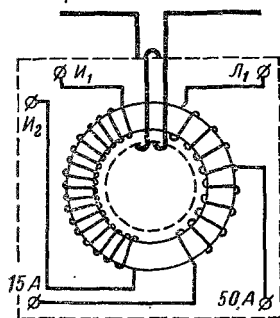
Рис. 4-10. Трансформатор тока типа 0-49У.

В установках с большими токами короткого замыкания при недостаточно надежной конструкции трансформа-

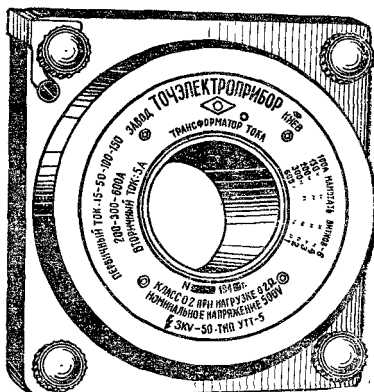
тора эти токи могут вызывать механические и термические повреждения трансформатора тока. Механические повреждения получаются вследствие электродинамического взаимодействия проводов с токами.

*Динамической устойчивостью* трансформатора тока называют отношение амплитуды тока, которую он может выдержать без изменения своих механических и электрических свойств в течение одного полупериода, к амплитуде номинального тока трансформатора

Витки первичной обмотки при токах 100–600 А



а)



б)

Рис. 4-11. Трансформатор тока типа УТТ-5.

а — схема; б — внешний вид.

*Термической устойчивостью* трансформатора тока называется отношение действующего значения тока, который трансформатор может выдержать в течение 1 с без изменения своих свойств, к действующему значению номинального первичного тока трансформатора.

В установках с большими токами короткого замыкания применяются конструкции трансформаторов тока, обладающие достаточной термической и динамической устойчивостью. Одна из таких конструкций показана на рис. 4-12. Трансформатор тока ТПОЛ10 — проходной одновитковый с литой изоляцией на 10 кВ. Первичная обмотка его выполнена из медного стержня 1, который охватывается двумя стальными магнитопроводами 2 с наложенными на них вторичными обмотками 3. Крепление деталей и изоляция выполнены заливкой эпоксидным

компаундом, образующим сплошной изоляционный корпус 4, надежно защищающий внутренние части от влаги и механических повреждений. Крепление трансформатора выполняется при помощи фланца 5.

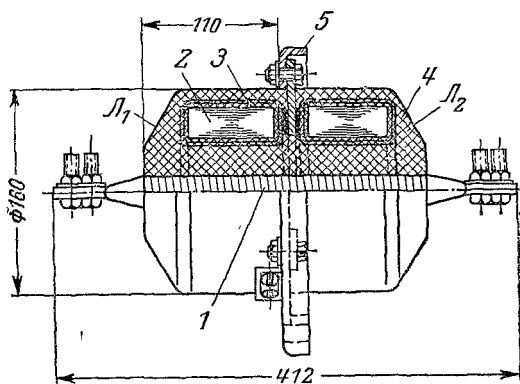


Рис. 4-12. Трансформатор тока типа ТПОМ10.

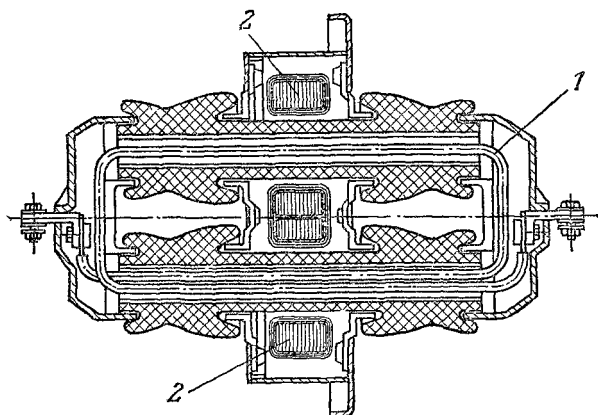


Рис. 4-13. Поперечный разрез трансформатора тока проходного типа с фарфоровой изоляцией (типа ТПФМ-10).

Трансформатор тока проходного типа с фарфоровой изоляцией (рис. 4-13) имеет первичную обмотку 1 из одного или нескольких витков, охватывающих два стальных магнитопровода 2 (рис. 4-9, а). Класс точности трансформатора 0,5, номинальное напряжение 10 кВ.

Разновидность трансформатора тока с разъемным магнитопроводом и вторичной обмоткой, замкнутой на амперметр (рис. 4-14), носит название измерительных клещей. Разъемный магнитопровод дает возможность измерять ток в проводе, не разрывая его, а только охватывая его как клещами. Измерительные клещи типа Ц-30 изготовляются на номинальные токи 15—30—75—300 и 600 А. Класс точности их 2,5, номинальное напряжение 600 В.

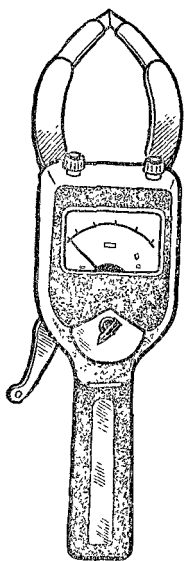


Рис. 4-14. Измерительные клещи типа Ц-30.

При напряжении 220 кВ и выше иногда применяются каскадные трансформаторы тока. Каскадный трансформатор тока состоит из нескольких, например из двух, ступеней, каждая из которых изолируется наполовину напряжения по отношению к земле, что облегчает получение более надежной изоляции.

Трансформаторы тока делят:

1) по роду установок — для внутренних установок; для наружных установок; встроенные, устанавливаемые внутри других аппаратов;

2) по способу установок — проходные, устанавливаемые в проемах стен или потолков; опорные;

3) по конструкции первичной обмотки — одновитковые — стержневые; одновитковые — шинные; многовитковые — катушечные и др.;

4) по роду изоляции — с воздушной изоляцией; с фарфоровой изоляцией; с литой изоляцией;

5) по степени точности (ГОСТ 7746-68 и 9032-69) — на семь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3 и 10 (табл. 4-3).

Государственным стандартом для трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 А установлены следующие значения номинальных вторичных нагрузок: 0,1; 0,15; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2,4; 3 и 4 Ом. Нижний предел вторичной нагрузки для трансформаторов с номинальной нагрузкой 0,1; 0,15; 0,2 и 0,4 Ом установлен соответственно 0,05; 0,1; 0,15 и 0,35 Ом. Тем же стандартом на трансформаторы тока установлены сле-

## Классы точности трансформаторов тока

Класс точности	Первичный ток, % номинального	Предельные значения		Пределы вторичной нагрузки, % номинальной, $\cos \varphi_2 = 0,8$
		токовой погрешности, %	угловой погрешности, мин	
0,2	10 20 100—120	$\pm 0,5$ $\pm 0,35$ $\pm 0,2$	$\pm 20$ $\pm 15$ $\pm 10$ }	25—100
0,5	10 20 100—120	$\pm 1$ $\pm 0,75$ $\pm 0,5$	$\pm 60$ $\pm 50$ $\pm 40$ }	25—100
1	10 20 100—120	$\pm 2$ $\pm 1,5$ $\pm 1$	$\pm 120$ $\pm 100$ $\pm 80$ }	25—100
3	50—120	$\pm 3$	Не нормируется	50—100
10	50—120	$\pm 10$	То же	50—100

дующие значения номинальных первичных токов: 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 800 А; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 15 кА.

Для каждого трансформатора тока завод-изготовитель, кроме значения номинальной вторичной нагрузки, при которой погрешности трансформатора не превышают установленные для его класса точности, указывает также вторичные нагрузки, при которых погрешности трансформатора не превышают значений, установленных для каждого из классов точности.

ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА.  
ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

А. ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

5-1. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
НАПРЯЖЕНИЯ И Э. Д. С.

Компенсационный метод является весьма точным для измерения напряжения, тока и сопротивления. Этот метод заключается в сравнении измеряемого напряжения с известным падением напряжения.

Одна из возможных схем дана на рис. 5-1. Вспомогательный источник питания  $E_{всп}$ , реостат  $r_{всп}$  и образцовые резисторы  $r_{AB}$  и  $r_{BC}$ , соединенные последовательно, образуют рабочую цепь, в которой устанавливается рабочий ток  $I_p$ .

Гальванометр можно соединять последовательно или с нормальным элементом  $E_n$  или с испытуемым элементом  $E_x$ .

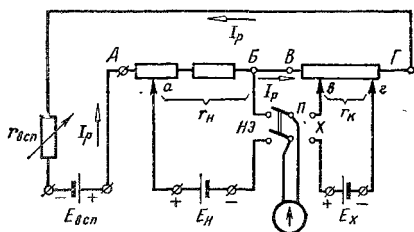


Рис. 5-1. Схема для измерения э. д. с. компенсационным методом.

Поставив переключатель гальванометра  $\Pi$  в положение  $HЭ$  и изменив сопротивление  $r_{всп}$ , получим нулевое отклонение гальванометра  $\alpha_r = 0$ . В этом случае э. д. с. нормального элемента уравновешена — компенсирована падением напряжения, созданным рабочим током в сопротивлении  $r_{AB}$ , т. е.

$$E_n = I_p r_{AB} = I_p r_n,$$

откуда точно определяется рабочий ток

$$I_p = E_n / r_n.$$

Поставив переключатель  $\Pi$  в положение  $X$  и переместив контакты  $\beta$ ,  $\gamma$ , вновь получим  $\alpha_r = 0$ . В этом случае э. д. с. испытуемого элемента компенсирована паде-



нием напряжения, созданным рабочим током в компенсационном сопротивлении  $r_K$ , т. е.

$$E_x = I_p r_K.$$

Из полученных выражений для  $E_x$  и  $E_H$  имеем их отношение:

$$E_x/E_H = r_K/r_H,$$

откуда измеряемая э. д. с.

$$E_x = \frac{E_H}{r_H} r_K = I_p r_K.$$

Отсутствие токов в элементах в момент измерения и определение измеряемой величины через э. д. с. нор-

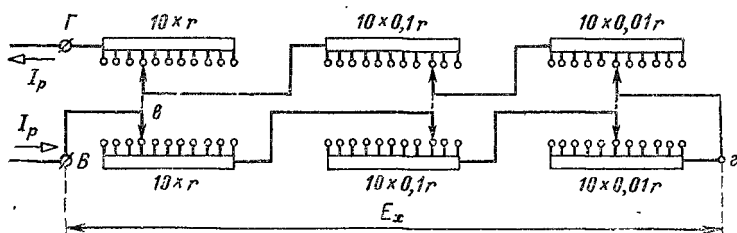


Рис. 5-2. Схема трех замещающих декад.

мального элемента и образцовые сопротивления, обладающие высокой точностью (§ 1-3, б и в), обеспечивают высокую точность результата измерения. Для обеспечения погрешности, не превышающей 0,02%, необходима установка компенсационного сопротивления  $r_K$  с точностью до пятого знака, что достигается, например, применением замещающих или, реже, шунтирующих декад.

Замещающими называются две декады (рис. 5-2) с катушками одинакового сопротивления, движки которых соединены механически, а схема обеспечивает при любом положении движков включение в цепь тока только десяти катушек из двух декад. При перемещении движков каждая выключенная катушка одной декады одновременно замещается катушкой другой декады, так что сопротивление всей цепи  $r_{ВГ}$ , а следовательно, и рабочий ток  $I_p$  не изменяются, но сопротивление части цепи  $r_{ВГ}$  и ее напря-

жение  $I_p r_{вт}$ , уравнивающее измеряемую э. д. с.  $E_x$ , изменяются.

Если сопротивление катушек каждой последующей декады в 10 раз меньше сопротивления катушек предыдущей, то при трех замещающих декадах можно установить компенсационное сопротивление цепи  $e - g$  и напряжение на ней с точностью до трех знаков.

## 5-2. ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Потенциометры, или, как их часто называют, компенсаторы, — это приборы сравнения, в основе работы которых лежит компенсационный метод измерения напряжения или э. д. с. Потенциометры принято делить на две группы: 1) потенциометры большого сопротивления или многоомные, рабочая цепь которых имеет сопротивление несколько десятков килоом. Они применяются для измерений напряжений или э. д. с., не превышающих нескольких вольт, и в основном используются для проверки приборов высокой точности (классов 0,1 — 0,5), а также для точных измерений напряжения, тока, сопротивления и т. п.; 2) потенциометры малого сопротивления или малоомные с сопротивлением рабочей цепи в один или несколько килоом. Они применяются для измерений напряжений или э. д. с. примерно до 0,1 В.

### а) Потенциометр постоянного тока высокоомный типа ППТВ-1

К зажимам потенциометра  $HЭ$  (рис. 5-3) подключается нормальный элемент, к зажимам  $X$  — измеряемое напряжение, к зажимам  $G$  — гальванометр, к зажимам  $ВВ$  — источник питания, обычно аккумулятор.

Чтобы получить рабочий ток  $I_p = 0,1$  мА, переключатель  $П$  устанавливают в положение  $HЭ$ ; при этом гальванометр соединен последовательно с нормальным элементом и напряжение на зажимах этой цепи равно падению напряжения, созданному током  $I_p$  в сопротивлении  $r_n$ , состоящем из 10 катушек по 1 000 Ом: магазина  $A$ , сопротивления 180 Ом и части сопротивления магазина  $F$ . Число ом этой части сопротивления должно быть установлено равным четвертому десятичному знаку значения э. д. с. нормального элемента при данной температуре.

Регулировка тока  $I_p$  производится сопротивлением

$r_{всп}$  — трехдекадным магазином резисторов  $9 \times 1\,000 + 9 \times 100 + 9 \times 10$  Ом и переменным сопротивлением 17 Ом. Нулевому показанию гальванометра соответствует номинальное значение тока  $I_p = 0,1$  мА. После перевода переключателя  $X$  компенсатор готов для измерения напряжения  $U_x$  или э. д. с.

Компенсация  $U_x$  ( $E_x$ ) производится резистором, состоящим из пяти декад. Декада  $A$  имеет 11 катушек по 1 000 Ом, падение напряжения на каждой из них равно 0,1 В.

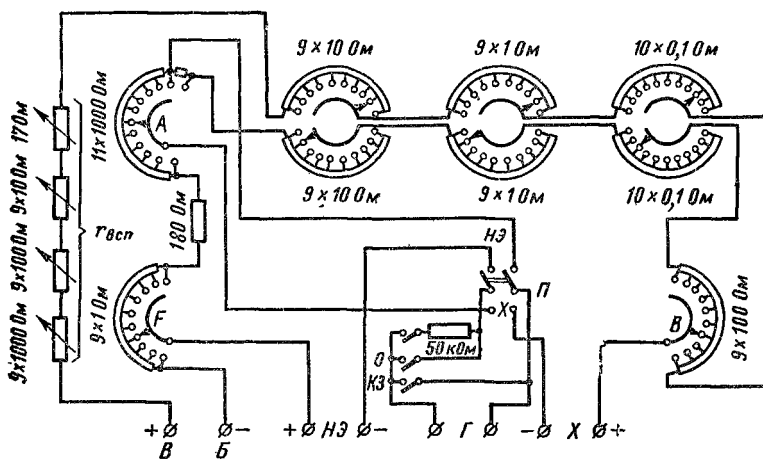


Рис. 5-3. Схема потенциометра ППТВ-1.

Декада  $B$  имеет 9 катушек по 100 Ом, падение напряжения на каждой из которых равно 0,01 В. Декады  $C$ ,  $D$  и  $E$  замещающие. Первые две имеют по 9 катушек, а последняя — 10 катушек; сопротивления катушек равны соответственно 10; 1 и 0,1 Ом, а падения напряжения на них — 0,001; 0,0001 и 0,00001 В. Номинальное падение напряжения на пяти декадах — номинальное напряжение компенсатора — равно 1,2 В.

Гальванометр включается сначала через защитное сопротивление 50 000 Ом нажатием кнопки с отметкой 50 кОм. После регулировки сопротивления  $r_{всп}$  или  $r_k$  и установки гальванометра на нуль шкалы гальванометр включается без защитного резистора нажатием кнопки с отметкой 0. Нажатием кнопки с отметкой КЗ гальванометр закорачивается для быстрого успокоения.

## б) Потенциометр типа Р-300

К зажимам *НЭ* потенциометра Р-300 (рис. 5-4) присоединяется нормальный элемент, к зажимам *Г* — гальванометр, к зажимам *Б* — наружная батарея, (при этом переключатель ставится в положение *БН*; при установке переключателя в положение *БВ* питание потенциометра происходит от внутренней батареи). Резистор  $r_{всп}$  состоит из четырех секций, две из них с рычажными переключателями для грубой регулировки и две с реохордами для плавной регулировки рабочего тока.

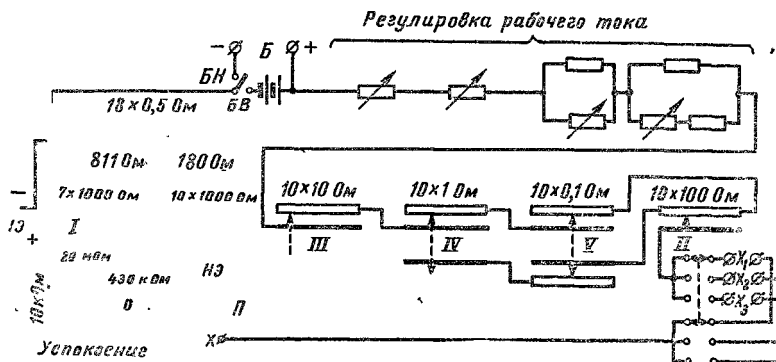


Рис. 5-4. Схема потенциометра Р-300.

Для установки рабочего тока  $I_p = 0,1$  мА переключатель *II* ставится в положение *НЭ*. При этом на зажимах цепи, состоящей из гальванометра и нормального элемента, будет напряжение, равное падению напряжения, созданному рабочим током в сопротивлении  $r_n$ . Это сопротивление состоит из  $10 \times 1\,000$  Ом +  $180$  Ом и части магазина  $18 \times 0,5$  Ом, число ом которого должно быть равно четвертому десятичному знаку э. д. с. нормального элемента для данной температуры. При  $\alpha_r = 0$  рабочий ток компенсатора  $I_p = 0,1$  мА. После этого переключатель *II* ставится в положение *Х*.

К трем парам зажимов  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$  присоединяются три измеряемых напряжения или э. д. с., включение каждой из которых в компенсационную цепь производится переключателем.

Компенсация измеряемой величины производится при помощи сопротивления  $r_k$ , имеющего пять декад: (I)

$18 \times 1\,000$  Ом, напряжение на каждой катушке 0,1 В; (II)  $10 \times 100$  Ом с напряжением на катушке 0,01 В. Декады III—V — замещающие и имеющие по 10 включенных катушек, сопротивление которых соответственно 10; 1 и 0,1 Ом, а напряжение на них 0,001; 0,0001 и 0,00001 В. Номинальное напряжение на пяти декадах равно 1,911 В.

При трех разомкнутых кнопках: «0», «430 кОм», «Успокоение» — последовательно с гальванометром включено сопротивление 20 МОм. При нажатии кнопки с отметкой «430 кОм» гальванометр включается последовательно с указанным (защитным) резистором, а при нажатии кнопки с отметкой «0» — без защитного резистора. Нажатием кнопки «Успокоение» достигается быстрое успокоение.

### 5-3. РАБОТА С ПОТЕНЦИОМЕТРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

При работе с потенциометром постоянного тока рекомендуется следующая последовательность операций:

1. Ознакомиться с потенциометром и его схемой.
2. Измерить температуру окружающей среды и вычислить по формуле (1-16) э. д. с. нормального элемента.
3. Установить сопротивление  $r_n$  в соответствии с найденной э. д. с.
4. Определить необходимую э. д. с. вспомогательной батареи ( $E_{всп}$ ) и выбрать батарею с ближайшим стандартным напряжением.
5. Определить все необходимые элементы и параметры цепи измеряемой величины (тока, напряжения, сопротивления и т. п.) и выбрать их.
6. Собрать схему в соответствии с заданием.
7. Установить в исходное положение движки всех реостатов, магазинов сопротивлений и переключателей.
8. Включить осветитель гальванометра и отрегулировать отсчетное и оптическое устройство, установив световую отметку на нуль шкалы.
9. При положении переключателя II потенциометра на отметке  $H\mathcal{E}$  замкнуть цепь гальванометра через защитный резистор и, изменяя сопротивление резистора  $r_{всп}$ , установить световую отметку на нуль шкалы гальванометра.
10. Замкнуть цепь гальванометра без защитного резистора и отрегулировать сопротивление  $r_{всп}$  так, чтобы

световая отметка оказалась на нуле шкалы, при этом устанавливается номинальный рабочий ток компенсатора 0,4 мА.

11. Перевести переключатель *П* в положение *Х*.

12. Подготовить и проверить цепь измеряемой величины.

13. Выяснить ориентировочное значение измеряемой величины  $U_x$  ( $E_x$ ) и установить движки магазинов сопротивлений  $r_k$  в положения, соответствующие этой (измеряемой) величине.

14. Вначале включить гальванометр через защитный резистор и установить его показания на нуль шкалы,

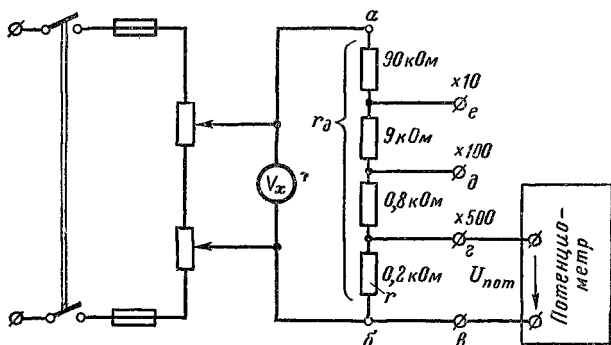


Рис. 5-5. Схема для измерения напряжения или проверки вольтметра потенциометром с применением делителя напряжения.

затем включить гальванометр без защитного резистора и снова установить на нуль; определить измеряемый параметр.

15. Переведя переключатель *П* в положение *НЭ*, убедиться в том, что рабочий ток компенсатора остался неизменным.

Потенциометры постоянного тока применяются для точных измерений э. д. с., напряжений, токов, сопротивлений и для проверок приборов — амперметров, вольтметров, ваттметров.

Наибольшее напряжение, которое можно непосредственно измерить потенциометром, составляет 1,2—2 В. При измерении больших напряжений применяют делитель напряжения (рис. 5-5), состоящий из нескольких последовательно соединенных сопротивлений.

Если на сопротивлении  $r$ , являющемся частью сопротивления делителя  $r_d$  (рис. 5-5), действует напряжение  $U_{\Pi}$ , измеряемое потенциометром, то на всем сопротивлении  $r_d$  напряжение равно:

$$U_x = U_{\Pi} r_d / r = U_{\Pi} k,$$

где  $k = r_d / r$  — коэффициент делителя.

Например, для часто встречающихся сопротивлений делителя  $r_d = 100$  кОм,  $r_{вг} = 200$  Ом,  $r_{вд} = 1$  кОм и  $r_{ве} = 10$  кОм получим:  $k_{вг} = r_d / r_{вг} = 100 / 0,2 = 500$ ;  $k_{вд} = 100$ ;  $k_{ве} = 10$ .

При номинальном напряжении потенциометра  $U_{\Pi} = 1,2$  В, используя различные зажимы делителя, получим наибольшие измеряемые напряжения:  $U'_x = U_{\Pi} k_{вг} = 1,2 \cdot 500 = 600$  В;  $U''_x = U_{\Pi} k_{вд} = 120$  В и  $U'''_x = U_{\Pi} k_{ве} = 12$  В.

Для измерения тока необходимо в цепь включить образцовую катушку сопротивления (резистор)  $r_0$  (рис. 5-6). Измерив компенсатором напряжение  $U_0$  на образцовой катушке, определяем ток в ней  $I_x = U_0 / r_0$ .

Падение напряжения на образцовом резисторе  $r_0$  при наибольшем измеряемом токе  $I_x$  не должно превышать номинального напряжения потенциометра  $U_{\Pi}$ , откуда сопротивление катушки  $r_0 \geq U_{\Pi} / I_x$ .

Мощность потерь в катушке при наибольшем измеряемом токе не должна превышать значений, указанных на катушке.

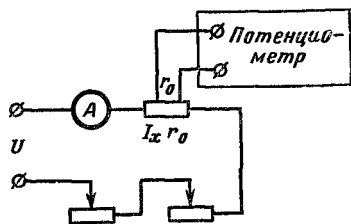


Рис. 5-6. Схема проверки амперметра потенциометром.

#### 5-4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

В автоматических потенциометрах установка рабочего тока и уравнивание измеряемой э. д. с. или напряжений происходят автоматически. Эти потенциометры непрерывно производят процесс измерения э. д. с. или функционально связанной с ней неэлектрической величины, например температуры, а также регистрируют и регулируют ее.

В качестве примера рассмотрим схему (рис. 5-7) автоматического электронного потенциометра типа ЭПД, который имеет две рабочие цепи, питаемые источником

с э. д. с.  $E_{всп}$ , рабочие токи  $I_{p1}$  и  $I_{p2}$  регулируются реостатом  $r_{всп}$ . При измерении переключатель  $\Pi$  находится в положении  $И$ . При этом измеряемая э. д. с.  $E_x$  уравновешивается напряжением  $U_{ав}$  между точками  $a$  и  $в$  рабочих цепей. Если  $E_x$  и  $U_{ав}$  не равны, то на участке  $aa'OИв$  возникает ток, направление которого определяется знаком разности величин  $E_x$  и  $U_{ав}$ . Замыкание цепи через контакты  $1$  или  $2$  (рис. 5-7) осуществляется якорем вибрационного преобразователя  $ВП$ , совершающего колебания вследствие того, что обмотка электромагнита преобразо-

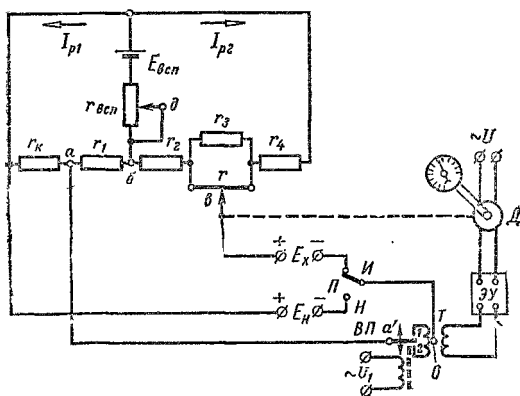


Рис. 5-7. Схема автоматического электронного потенциометра.

вателя питается синусоидальным напряжением  $U_1$ . При этом ток проходит то по одной, то по другой половине первичной обмотки трансформатора  $T$ . В результате во вторичной обмотке трансформатора наводится переменная э. д. с., фаза которой зависит от направления тока в цепи  $E_x$  и, следовательно, от того, какая из величин  $E_x$  или  $U_{ав}$  больше. Вторичное напряжение трансформатора, усиленное электронным усилителем  $ЭУ$ , подается на реверсивный двигатель  $Д$ , который перемещает движок  $в$ , изменяющий сопротивление  $r$  до тех пор, пока  $E_x$  не уравновесится напряжением  $U_{ав}$ . Статор реверсивного двигателя имеет две обмотки. Одна из них питается от сети переменного тока (127 В, 50 Гц), вторая (управляющая) — от электронного усилителя. Направление вращения поля статора, а следовательно, и короткозамкну-



того ротора двигателя изменяется при изменении фазы тока в управляющей обмотке, которая в свою очередь зависит от фазы э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора  $T$ . Тот же двигатель  $D$  приводит в движение стрелку показывающего и самопишущего устройства и механизм, регулирующий измеряемую величину.

Рабочий ток компенсатора не должен изменяться при изменении  $E_x$ .

При установке и регулировке рабочих токов переключатель  $\Pi$  должен быть в положении  $H$ . При этом ось редуктора двигателя расцепляется с движком  $\epsilon$  и сцепляется с движком  $\delta$  реостата  $r_{всп}$ ; э. д. с. нормального элемента  $E_H$  компенсируется падением напряжения  $U_H = I_{р1}r_H$ , так как это соответствует номинальному току  $I_{р1}$ . При отсутствии этой компенсации в цепи вибрационного преобразователя и трансформатора пойдет ток, и во вторичной обмотке трансформатора будет индуцироваться э. д. с., которая после усиления воздействует на двигатель  $D$ , вызывая его вращение. При этом изменяется  $r_{всп}$ . Вращение двигателя прекратится, когда рабочий ток  $I_{р1}$  достигнет номинального значения и произойдет компенсация  $E_H$  напряжением  $U_H$ .

Автоматические потенциометры применяются для измерения, записи и регулирования температуры и работают совместно с термопарами и радиационными пирометрами. Они применяются для измерений, записи и регулирования ряда других электрических и неэлектрических величин. Погрешность таких компенсаторов  $\pm 0,5\%$ .

## 5.5. ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В потенциометрах переменного тока, так же как и в потенциометре постоянного тока, измеряемая э. д. с. уравнивается известным напряжением.

Отсутствие точной меры переменной э. д. с., подобной нормальному элементу, приводит к необходимости устанавливать рабочий ток компенсатора по амперметру класса точности 0,1 или 0,2, вследствие чего точность компенсатора переменного тока обычно невелика. Для уменьшения погрешности установки рабочего тока примерно до 0,02 % применяют компараторы с использованием термопреобразователя.

Переменная величина определенной частоты характеризуется амплитудой и фазой, поэтому и компенсирующее

переменное напряжение регулируется по модулю и фазе. Если для изменения фазы используют фазорегуляторы, то потенциометры называются полярными, так как вектор компенсирующего напряжения определяется в полярных координатах. Если же компенсирующее напряжение состоит из двух составляющих, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ , регулируемых независимо друг от друга, то потенциометры называются прямоугольно-координатными или комплексными.

В прямоугольно-координатном потенциометре (рис. 5-8, а) имеются две рабочие цепи. Первая состоит из

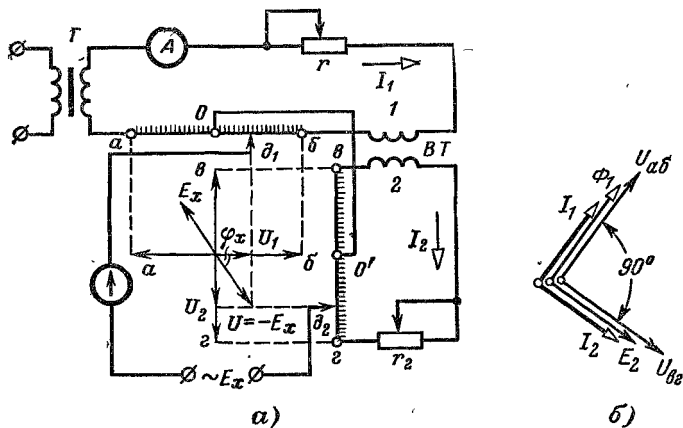


Рис. 5-8. Принципиальная схема прямоугольно-координатного потенциометра (а) и векторная диаграмма потенциометра (б).

вторичной обмотки питающего трансформатора  $T$ , амперметра, реостата  $r$ , первичной обмотки воздушного трансформатора  $BT$  и калиброванной проволоки с сопротивлением  $r_{аб}$ . При неизменном значении рабочего тока  $I_1$  этой цепи неизменными будут напряжение  $U_{аб}$  на калиброванной проволоке и напряжения на ее участках  $Oa$  и  $O\delta_1$ , которые можно отсчитать по имеющейся шкале.

Вторая рабочая цепь состоит из вторичной обмотки трансформатора  $BT$ , реостата  $r_2$  и калиброванной проволоки сопротивлением  $r_{вг}$ .

Ток  $I_1$  возбуждает в трансформаторе  $BT$  магнитный поток  $\Phi_1$ , совпадающий с ним по фазе (рис. 5-8, б), а наведенная им во вторичной обмотке э. д. с.  $E_2$  отстает по

фазе от тока  $I_1$  на  $90^\circ$ . Реактивное сопротивление  $x_{L_2}$  мало по сравнению с активным сопротивлением второй цепи. Поэтому ток  $I_2$  практически совпадает по фазе с э. д. с.  $E_2$  и отстает от  $I_1$  на угол  $90^\circ$ . Напряжение на калиброванной проволоке  $U_{вг}$  совпадает по фазе с током  $I_2$  и сдвинуто на  $90^\circ$  от  $U_{аб}$ .

Средние точки калиброванных проводов  $O$  и  $O'$  электрически соединены между собой и имеют одинаковый потенциал. Если установить движок  $\partial_2$  в точке  $O'$  и перемещать движок  $\partial_1$  вправо, то напряжение между движками, совпадающее по фазе с напряжением  $U_{аб}$ , можно отсчитать по шкале.

Если перемещать движок  $\partial_1$  в противоположную сторону от точки  $O$ , то получим напряжение между движками сдвинутым по фазе на  $180^\circ$  от напряжения  $U_{аб}$ . Аналогично при движке  $\partial_1$ , расположенном в точке  $O$ , перемещая движок  $\partial_2$  вверх от точки  $O'$ , получаем напряжение между движками, совпадающее по фазе  $U_{вг}$ ; перемещая движок  $\partial_2$  вниз от точки  $O'$ , получаем напряжение, имеющее противоположную фазу. Полученные напряжения можно представить векторами, расположенными по осям топографической диаграммы (рис. 5-8, а). Если, например, движки находятся в положениях, указанных на рис. 5-8, а, то напряжение  $U$  между ними определится вектором, равным геометрической сумме векторов  $U_1$  и  $U_2$ . Модуль этого напряжения  $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ , а тангенс угла между векторами  $\operatorname{tg} \varphi = U_2/U_1$ .

Если при некотором положении движков гальванометр показывает нуль, то измеряемая э. д. с.  $E_x$  компенсируется известным напряжением  $U$ , т. е.  $E_x$  равна по модулю и противоположна по фазе напряжению  $U$  (рис. 5-8, а).

Таким образом, потенциометр дает возможность определять модуль и фазу измеряемых э. д. с. и напряжений.

Схема отечественного потенциометра переменного тока типа Р-56 дана на рис. 5-9. Номинальные напряжения потенциометра 1,6 и 0,16 В, рабочий ток его 0,5 А. Этот ток проходит по цепи, состоящей из шунта  $r_{ш}$ , первичной обмотки воздушного трансформатора  $BT$  и амперметра класса 0,1 или 0,2.

Параллельно шунту присоединена цепь, состоящая из реохорда с сопротивлением 1 Ом и 15 катушек магазина резисторов (по 1 Ом). Переключатель  $П_5$  может находиться в двух положениях — 1 или 0,1. В первом случае идет

ток 0,1 А и напряжение на каждом сопротивлении 1 Ом составит 0,1 В; при втором положении переключателя ток и напряжения уменьшаются соответственно в 10 раз. Напряжение между движками  $\Pi_1$  и  $P_1$  уравнивает одну из составляющих измеряемого напряжения  $U_x$ .

Во вторичной цепи трансформатора  $BT$  включены реохрд с сопротивлением 10 Ом и 15 катушек магазина

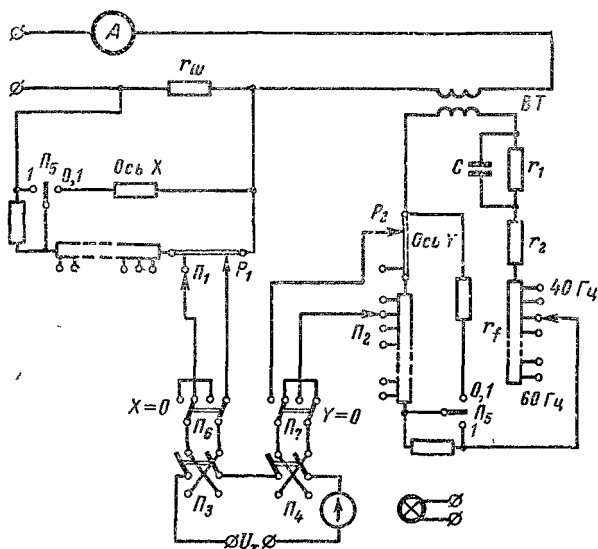


Рис. 5-9. Упрощенная схема потенциометра переменного тока Р-56.

резисторов (по 10 Ом). Если переключатель  $\Pi_5$  находится в положении 1, то ток этой цепи 0,01 А, а напряжение на каждом из резисторов 10 Ом 0,1 В. При втором положении переключателя (0,1) ток и частичные напряжения в цепи реохрд — магазин уменьшаются в 10 раз. Напряжение между движками  $\Pi_2$  и  $P_2$  уравнивает вторую составляющую измеряемого напряжения, сдвинутую по фазе относительно первой на  $90^\circ$ . Кроме того, во вторичной цепи трансформатора включены резисторы  $r_1$  и  $r_2$ , а также конденсатор  $C$ , обеспечивающие сдвиг тока этой цепи относительно тока первой цепи на  $90^\circ$ . Резистором  $r_f$  ток цепи поддерживается неизменным при изменении частоты от 40 до 60 Гц.

Переключателями  $P_3$  и  $P_4$  можно изменять на  $180^\circ$  фазы составляющих измеряемого напряжения, подлежащих компенсации.

Расширение предела измерения напряжения производится делителем напряжения с номинальными значениями 3—7,5—15—30—75—150 и 300 В.

Потенциометр присоединяется к сети через питающий изолирующий трансформатор.

## Б. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

### 5-6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИФРОВЫХ ПРИБОРАХ

Известно (§ 1-4, а), что приборы по системе отсчета показаний делятся на приборы с непрерывным отсчетом — аналоговые и приборы с дискретным отсчетом — цифровые, показания которых выражаются в цифровой форме.

В большинстве приборов с непрерывным отсчетом происходит преобразование измеряемой физической величины в другую физическую величину, изменяющуюся аналогично измеряемой или, как говорят, являющуюся аналогом измеряемой. Например, при измерении переменного напряжения термовольтметром по рамке измерительного механизма прибора проходит постоянный термоэлектрический ток, являющийся аналогом измеряемого напряжения. Этот ток вызывает вращающий момент и перемещение (поворот) подвижной части, подобное (аналогичное) измеряемому (входному) напряжению. Числовое значение измеряемой величины получается в результате отсчета по шкале аналогового прибора, а иногда, кроме того, и в результате некоторых добавочных вычислений, на что затрачивается много времени и что сопряжено с субъективными погрешностями, снижающими точность измерений.

В цифровых приборах результат измерений представляется непосредственно в цифровой форме или в виде кода, так что устраняются субъективные ошибки, ускоряется процесс измерения, а при сочетании такого прибора с регистрирующим устройством процесс измерения автоматизируется.

В основе измерения цифровым прибором непрерывной величины лежит процесс квантования (или дискретизации)

по времени и по уровню (рис. 5-10), т. е. преобразование ее в дискретную.

Квантование по времени заключается в получении через равные промежутки времени  $\Delta t$  (рис. 5-10) мгновенных значений  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ ,  $x(t_3)$ , ...,  $x(t_n)$ , определяющих непрерывно изменяющуюся измеряемую величину  $x(t)$ , приложенную к входным зажимам цифрового прибора.

Так как отсчетное устройство цифрового прибора обладает определенным ограниченным количеством цифр, то измеряемую величину, изменяющуюся в пределах от  $x = 0$  до  $x = x_{\text{ном}}$ , можно выразить только конечным

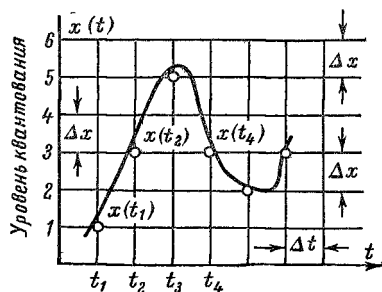


Рис. 5-10. Квантование непрерывной величины  $x(t)$  по времени и уровню.

рядом значений или уровней (квантование по уровню).

При одинаковых интервалах между отдельными значениями дискретная величина называется квантованной, а интервал между ними  $\Delta x$  — квантом. Таким образом, квант равен отношению номинального значения величины  $x_n$  к числу уровней квантования  $N$ , т. е.  $\Delta x = x_n/N$ .

В цифровых приборах возникает погрешность дискретности, представляющая собой разность между показанием прибора (ординаты уровней квантования на рис. 5-10) и истинным значением величины (ординаты кривой на рис. 5-10).

Цифровым кодированием называется процесс выражения численного значения измеряемой величины в определенной системе счисления.

В повседневной жизни применяется десятичная система счисления с основанием, равным 10, в которой любое целое число представляется суммой некоторого числа единиц, десятков, сотен и т. д. Например,  $803 = 8 \cdot 10^2 + 0 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$ . Таким образом, любое целое число состоит из суммы  $10^0 + 10^1 + 10^2 + 10^3 + \dots$ , каждое из которых может множиться на одну из десяти цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9.

Таким образом, в десятичной системе счисления произвольное целое число можно представить в следующем

общем виде:

$$\begin{aligned} N_{10} &= k_{i(n-1)} \cdot 10^{(n-1)} + k_{i(n-2)} \cdot 10^{(n-2)} + \dots + k_{i0} \cdot 10^0 = \\ &= \sum_{i=0}^{i=(n-1)} k_i \cdot 10^i, \end{aligned}$$

где 10 — основание системы счисления, равное числу символов, используемых в системе;

$n$  — количество разрядов числа;

$k_i$  — коэффициент, принимающий значение от 0 до 9.

В написанном выражении величина  $10^i$  называется весовым коэффициентом или просто весом, так как каждый кодовый символ в зависимости от его места имеет свой вес.

При записи в десятичной системе счисления ради упрощения записываются только коэффициенты  $k_i$ , а весовые коэффициенты и знаки сложения отбрасываются, например рассмотренное выше число 803 содержит только коэффициенты  $k_i$  8—0—3, а весовые коэффициенты  $10^i$ :  $10^2$  —  $10^1$  —  $10^0$  — отброшены.

В цифровой электроизмерительной технике используется преимущественно двоичная система счисления. Важным преимуществом этой системы является наличие в ней всего двух цифр, дающих возможность использовать в схемах элементы, обладающие двумя устойчивыми состояниями (реле, триггеры).

В двоичной системе любое целое число представляется суммой чисел  $2^0$ ,  $2^1$ ,  $2^2$ ,  $2^3$  и т. д., каждое из которых можно взять 0 или 1 раз. Например,  $14 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$ . В отличие от десятичной системы счисления в каждом разряде двоичного числа могут быть только две цифры: 0 или 1. Рассмотренное двухразрядное десятичное число 14 можно записать в двоичной системе счисления как четырехразрядное число  $14_{10} = 1110_2$ . Эта запись означает, что (читая справа налево) отсутствует слагаемое  $2^0$ , а имеются слагаемые  $2^1$ ,  $2^2$  и  $2^3$ . Запись 14 называется десятичным кодом, а запись 1110 — двоичным кодом числа.

Таким образом, в двоичной системе счисления произвольное число можно представить в следующем общем виде:

$$\begin{aligned} N_2 &= k_{i(n-1)} \cdot 2^{n-1} + k_{i(n-2)} \cdot 2^{(n-2)} + \dots + k_0 \cdot 2^0 = \\ &= \sum_{i=0}^{i=(n-1)} k_i \cdot 2^i, \end{aligned}$$

где 2 — основание системы счисления, равное числу символов, используемых в системе;

$n$  — количество разрядов числа;

$k_i$  — коэффициент, принимающий значение 0 или 1.

При записи в двоичной системе счисления аналогично десятичной системе ради упрощения записываются только коэффициенты  $k_i$ , а весовые коэффициенты  $2^i$  и знаки сложения отбрасываются. Так, например, в рассмотренном выше примере  $14_{10} = 1110_2$  в двоичном коде записаны только коэффициенты  $k_i = 1-1-1-0$ .

Аналогично десятичной системе в двоичной системе дробные части числа отделяются от целого числа запятой, причем если в десятичной системе в дробной части суммируются десятые, сотые, тысячные доли, то в двоичной системе в дробной части суммируются половины, четверти, восьмые и т. д., так, например,  $14,14 = 1110,1110$ .

Слагаемые дробной части написанного выражения отличаются от слагаемых целой части числа только отрицательными показателями степеней.

В табл. 5-1 даны записи некоторых чисел в десятичной и двоичной системах счисления.

Таблица 5-1

Записи некоторых чисел в десятичной и двоичной системах счисления

Десятичная	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1/2	1/4	1/8
Двоичная	0	1	10	11	100	101	110	111	1000	1001	1010	1011	0,1	0,01	0,001

Переход от двоичного счета к десятичному можно выполнить следующим образом. Если в разряде двоичного числа стоит 0, то цифра предыдущего старшего разряда множится на 2. Если в разряде числа стоит 1, то цифра предыдущего разряда множится на 2 и к произведению прибавляется единица. Найдем, например, десятичное число, соответствующее двоичному 1101. Так как во втором разряде стоит 1, то цифра предыдущего разряда, т. е. первого, множится на 2 и к произведению прибавляется 1, так что  $1 \cdot 2 + 1 = 3$ . В третьем разряде числа стоит 0, поэтому полученный результат множится на 2, т. е.  $3 \cdot 2 = 6$ , наконец, в четвертом разряде стоит 1,



следовательно,  $6 \cdot 2 + 1 = 13$ . Проверка:  $1101 = 1 \cdot 2^3 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 8 + 4 + 0 + 1 = 13$ .

Переход от десятичного счета к двоичному можно выполнить следующим образом. Делим десятичное число на 2 и записываем остаток, равный 1 или 0 (табл. 5-2).

Таблица 5-2

Нахождение двоичного кода числа

Деление на 2	Остаток	Двоичное число
$14 : 2 = 7$	0	
$7 : 2 = 3$	1	
$3 : 2 = 1$	1	
$1 : 2 = 0$	1	
		1110

Делим частное от деления на 2 и снова записываем остаток (1 или 0) и т. д. Переписывая остатки из колонки в строку справа налево, получаем соответствующее двоичное число. В примере, рассмотренном в табл. 5-2, полученное число  $1110 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 8 + 4 + 2 + 0 = 14$ .

Двоично-десятичная система представляет собой сочетание двоичной и десятичной систем. В этой системе сохраняется расположение десятичных разрядов, а цифры каждого разряда образуются группой из четырех двоичных символов 0 или 1. Например, десятичное число  $735_{(10)}$  в двоично-десятичной системе запишется так: 0111 0011 0101. В двоично-десятичном коде разрядам, идущим один за другим справа налево, приписываются все веса, равные последовательно возрастающим степеням 2 (8—4—2—1), а десятичная цифра равна сумме произведений этих весов на соответствующую двоичную цифру 0 или 1. Кроме указанного выше кода с весами 8—4—2—1, применяются и другие коды, например с весами 5—1—2—1 или 2—4—2—1.

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) можно разделить по следующим признакам: 1) по роду измеряемой величины на вольтметры, вольтамперметры, омметры, фазометры, частотомеры и др.; 2) по типу применяемых элементов на электронные и электромеханические. В пер-

вых из них используются электронные и полупроводниковые бесконтактные элементы, поэтому скорость их работы велика, что является их достоинством, погрешность их составляет 0,1—0,5 %. Во вторых — используются электромеханические элементы: реле, переключатели и т. п., поэтому скорость их работы низкая, продолжительность одного измерения составляет несколько десятых долей секунды. Точность их очень высокая (0,01 — 0,005 %); по методу преобразования непрерывной величины в цифровую форму, т. е. по способу кодирования, цифровые приборы делятся на следующие группы: а) приборы геометрического (пространственного) кодирования; б) приборы число-импульсного, время-импульсного и частотно-импульсного кодирования; в) приборы поразрядного кодирования.

### 5-7. КОДИРУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В приборах геометрического кодирования измеряемая величина сначала преобразуется в линейное или угловое перемещение (перемещение электронного луча или поворот вала и т. п.), а затем

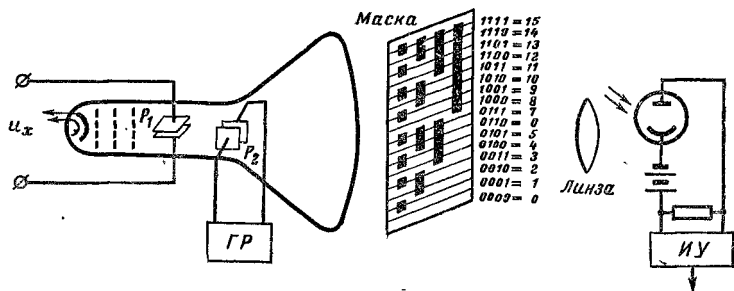


Рис. 5-11. Схема цифрового прибора с пространственным кодированием.

с помощью кодирующей маски соответствующей формы преобразуется в цифровую форму. Применяются электроконтактные, индуктивные, фотооптические, электронные и другие кодирующие преобразователи.

В качестве примера рассмотрим принцип работы цифрового прибора с пространственным кодированием (рис. 5-11) с электронно-лучевой трубкой и кодирующей маской, выполненной в двоичной системе счисления.

Измеряемое постоянное напряжение  $U_x$  подводится к вертикально отклоняющим пластинам  $P_1$  трубки. Вследствие этого электронный луч отклонится по вертикали на величину, пропорциональную напряжению  $U_x$ , и окажется на соответствующей строке маски. Под действием напряжения генератора развертки (ГР), приложенного ко второй паре отклоняющих пластин  $P_2$ , электронный луч будет перемещаться вдоль соответствующей строки маски, попадая то на прозрачные, то на непрозрачные ее участки. Луч, попадая на экран через прозрачные участки маски, вызывает его свечение; в результате

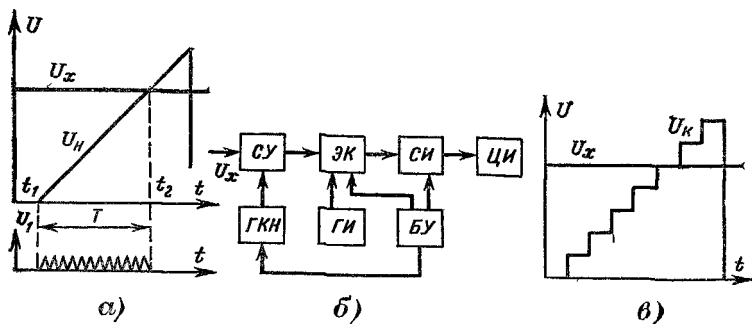


Рис. 5-12. Графики компенсирующего  $U_K$ , измеряемого  $U_x$  и импульсного  $U_1$  напряжений (а); структурная схема время-импульсного кодирования (б); графики компенсирующего и измеряемого напряжения преобразователя с число-импульсным кодированием (в).

этого на фотозлемент воздействуют световые импульсы, которые после усиления в виде цифрового кода поступают на выход.

Основным преимуществом приборов с геометрическим кодированием является быстродействие. Погрешность их не превышает 1 %.

В приборах с время-импульсным кодированием измеряемая величина, например напряжение  $U_x$ , преобразуется в промежуток времени  $T$  (рис. 5-12, а) путем сравнения измеряемого напряжения  $U_x$  с пилообразным компенсирующим напряжением  $U_K$ , изменяющимся до некоторого максимума пропорционально времени  $U_K \equiv t$ , затем спадающим до нуля и снова изменяющимся пропорционально времени и т. д.

При включении напряжения  $U_x$  блок управления  $БУ$  (рис. 5-12, б) включает генератор компенсирующего

пилеобразного напряжения  $ГКН$ , и в тот же момент  $t_1$  электронный ключ  $ЭК$  открывается и начинает пропускать импульсы напряжения от генератора стабильной частоты  $ГИ$  в счетчик импульсов  $СИ$ . Компенсирующее напряжение, изменяясь пропорционально времени, достигнет значения  $U_K = U_x$  в момент времени  $t_2 = t_1 + T$ . В этот момент сравнивающее устройство  $СУ$  закроет ключ  $ЭК$ , прекращающий доступ импульсов в счетчик  $СИ$ , который подсчитает количество импульсов  $N$  за время  $T$ , пропорциональное измеряемому напряжению  $U_x$ , и цифровой индикатор  $ЦИ$  выдает результат измерения. После момента  $t_2$  пилообразное напряжение нарастает до своего максимума, а затем спадает. По прошествии некоторого времени, необходимого для отсчета по команде блока  $БУ$ , показания счетчика сбрасываются на нуль, и затем начинается новый цикл сравнения  $U_x$  и  $U_K$ .

Погрешность результата измерения, зависящая от линейности и постоянства крутизны пилообразного напряжения, а также постоянства частоты импульсов, составляет 0,02 — 0,1 %. Быстродействие их не превышает нескольких тысяч измерений в секунду.

Рассмотренные преобразователи нашли широкое применение вследствие относительной простоты.

В приборах с число-импульсным кодированием измеряемая величина, например напряжение  $U_x$ , преобразуется в число импульсов. Для этого используется источник со ступенчато-изменяющимся (возрастающим или убывающим) компенсирующим напряжением  $U_K$  (рис. 5-12, в). Число ступенек этого напряжения в момент компенсации, т. е. при  $U_x = U_K$ , пропорционально измеряемому напряжению. Таким образом, измеряемая величина преобразуется в число импульсов, равное числу ступенек компенсирующего напряжения. Точность работы такого преобразователя зависит от числа ступенек напряжения и от постоянства их амплитуды.

В приборах с частотно-импульсным кодированием измеряемая величина преобразуется в импульсы, частота которых пропорциональна измеряемой величине. Следовательно, определяемое число импульсов за постоянный промежуток времени будет пропорционально измеряемой величине.

Генератор управляемой частоты  $ГУЧ$  (рис. 5-13) выдает импульсы, частота которых пропорциональна зна-

чению входной величины. Эти импульсы в течение заданного датчиком интервалов времени *ДИВ* промежутка времени *T* проходят через ключ *ЭК* и фиксируются счетчиком импульсов *СИ*. По прошествии времени, необходимого для считывания результатов измерения, блок управления *БУ* выдает сигнал сброса счетчику импульсов, после чего цикл измерения начинает повторяться.

Частотно-импульсное кодирование применяется, в частности, в цифровых фазометрах и частотомерах.

В приборах поразрядного кодирования (вольтметрах) измеряемое постоянное на-

пряжение  $U_x$  периодически сравнивается с образцовым напряжением  $U_{0i}$ . Образцовое напряжение, получаемое в блоке *БОН* (рис. 5-14), подводится к сравнивающему устройству *СУ*. Это напряжение снимается со ступенчатого потенциометра (рис. 5-15), переключение сопротивлений которого производится управляющим устройством *УУ* (рис. 5-14). К входным зажимам этого устройства подключен генератор тактовых импульсов *ГТИ*, задающий режим работы всей схемы. Вырабатываемый в процессе сравнения напряжений код передается цифровому индикатору.

Ступени образцового напряжения, получаемого с указанного выше потенциометра при двоичной системе счисления, имеют значения:  $2^0 = 1$ ;  $2^1 = 2$ ;  $2^2 = 4$ ;  $2^3 = 8$ ;  $2^4 = 16$ ;  $2^5 = 32$ ;  $2^6 = 64$  и т. д. выбранных единиц. Потенциометр (рис. 5-15) состоит из двух одинаковых групп сопротивлений: верхней *A* и нижней *B*. В начале сопротивления группы *A* замкнуты накоротко, а сопротивления группы *B*, наоборот, включены в цепь.

Процесс сравнения измеряемого напряжения, которое предположительно имеет значение  $U_x = 40$ , начинается с определения коэффициента старшего разряда  $U_x$ . Импульсом, поступающим с управляющего устройства *УУ* (рис. 5-15), сопротивление *A64* размыкается, а *B64* за-

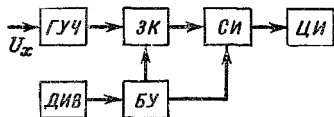


Рис. 5-13. Структурная схема частотно-импульсного кодирования.

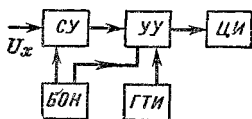


Рис. 5-14. Структурная схема цифрового преобразователя с поразрядным кодированием.

мыкается накоротко, так что на сравнивающее устройство  $CY$  воздействуют напряжения  $U_x$  и  $U_0 = 64$ . Так как  $U_0 > U_x$  (рис. 5-16), то сравнивающее устройство выдает

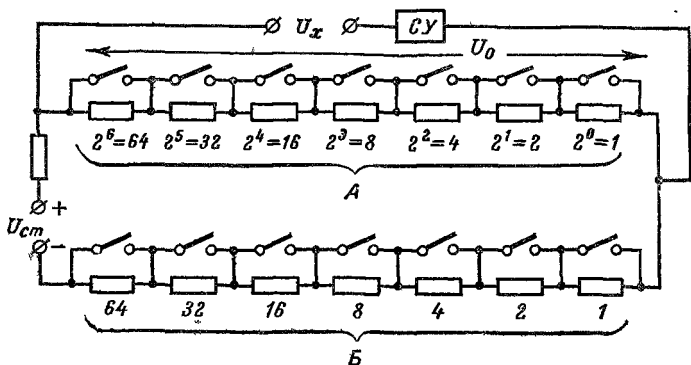


Рис. 5-15. Схема ступенчатого потенциометра.

импульс, возвращающий сопротивления  $A64$  и  $B64$  в их начальные состояния (первое из них размыкается, а второе замыкается накоротко), одновременно регистрируется коэффициент 0 в соответствующем разряде (рис. 5-16).

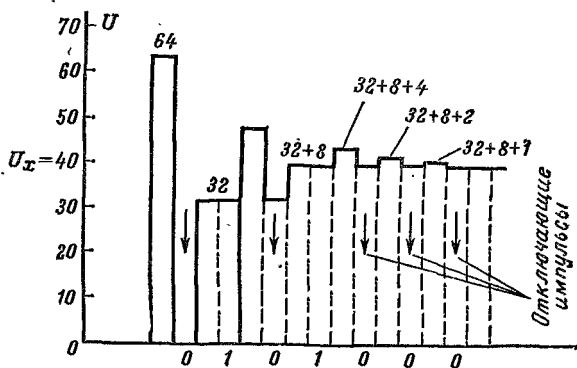


Рис. 5-16. Работа преобразователя с поразрядным кодированием.

Вторым импульсом  $UУ$  сопротивление  $A32$  размыкается, а  $B32$  замыкается накоротко так, что на сравнивающее устройство воздействуют два напряжения: образцовое  $U_0 = 32$  и измеряемое  $U_x > U_0$ . При таком соотношении

напряжений импульсом  $СУ$  сопротивление  $A32$  остается включенным и регистрируется коэффициент 1 соответствующего разряда.

Третьим импульсом  $УУ$  сопротивление  $A16$  размыкается, а  $B16$  замыкается. Теперь  $U_0 = 32 + 16 = 48 > U_x$ , и импульсом  $СУ$  сопротивление  $A16$  замыкается накоротко, сопротивление  $B16$  размыкается, и регистрируется 0 соответствующего разряда.

Следующим импульсом  $УУ$  сопротивление  $A8$  размыкается, а  $B8$  замыкается. Теперь напряжение  $U_0 = 40 = U_x$ , сопротивление  $A8$  остается включенным, и регистрируется коэффициент 1 соответствующего разряда.

Далее поочередно включаются, а затем выключаются сопротивления  $A4$ ,  $A2$  и  $A1$ , при этом в соответствующих разрядах регистрируются 000. Таким образом, измерение заканчивается и выдается двоичный код, который в данном случае будет 101000.

## 5-8. ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ

### а) *Ключи. Логические элементы. Триггеры*

**К л ю ч о м** называется устройство, предназначенное для замыкания или размыкания электрической цепи.

В цифровых измерительных приборах применяются контактные и бесконтактные ключи; первые — преимущественно в электромеханических, а вторые — в электронных приборах.

В качестве контактных ключей применяются различные электромагнитные реле с контактными исполнительными механизмами. Быстродействие их невелико и не превышает десятка включений в секунду. Они имеют малое стабильное переходное сопротивление контактов (сотые доли ома), что достигается применением контактов, изготовленных из специальных сплавов (например, реле типа РПС-20, РПС-25 и др.).

В качестве бесконтактных ключей применяются некоторые электронные схемы, обладающие двумя устойчивыми состояниями. Одно из них — открытое, при котором сигналы могут проходить в определенную цепь, а другое — закрытое, при котором сигналы в эту цепь проходить не могут. Эти ключи не имеют механических переключающих контактов и поэтому обладают значительно большим быстродействием.

Упрощенная схема транзисторного ключа дана на рис. 5-17. Управляющие импульсы  $U_{вх}$  подаются в цепь база — эмиттер. При входном отрицательном импульсе на сопротивлении нагрузки  $r_k$ , включенном в цепь коллектора, возникает импульс выходного напряжения  $U_{вых}$ , т. е. ключ открыт. При небольшом (0,5—1 В) положительном потенциале базы по отношению к эмиттеру ключ закрыт.

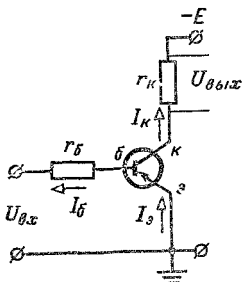


Рис. 5-17. Схема транзисторного ключа.

В качестве электронного ключа используется также элемент И с двумя входами, рассмотренный ниже (рис. 5-18, а).

Логическими элементами называются устройства, выполняющие простейшие логические операции И, ИЛИ и НЕ. Они основаны на применении электронных, полупроводниковых и магнитных приборов.

Схема совпадения (элемент И) с применением полупроводниковых диодов показана на рис. 5-18, а. Потенциал верхнего зажима  $B$  схемы отрицателен, т. е.  $\varphi_B < 0$

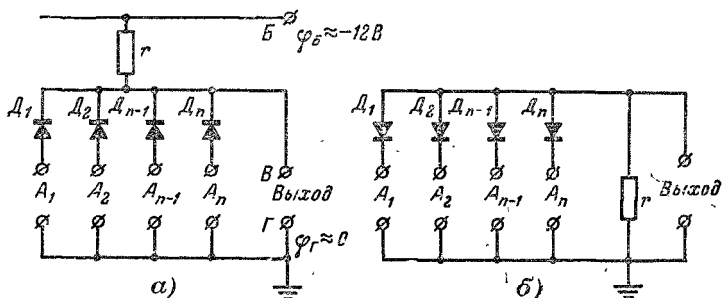


Рис. 5-18. Логические элементы.

а — схема совпадения (И); б — собирательная схема (ИЛИ).

(например,  $\varphi_B \approx -12$  В), а потенциал нижнего зажима  $G$  равен нулю ( $\varphi_G = 0$ ). При появлении на всех входных зажимах  $A_1, A_2, \dots, A_n$  отрицательного импульса напряжения все диоды  $D_1, D_2, \dots, D_n$  окажутся запертыми, при этом ток в сопротивлении  $r$  равен нулю и потенциал верхнего выходного зажима  $B$ , так же как и зажима  $B$ , будет отрицательным, т. е.  $\varphi_B = \varphi_B \approx -12$  В, так что



отрицательный импульс передан на выход. Этот импульс (сигнал) обозначают  $I$ . Таким образом, элемент И выдает сигнал  $I$  только при одновременном действии на всех его входах  $A_1, A_2, \dots, A_n$  сигнала  $I$ , почему схема и носит название схемы совпадения. Во всех других случаях на выходных зажимах потенциал будет близок к нулю — сигнал  $0$ .

Если рассмотренная схема имеет только два входа  $A_1$  и  $A_2$ , то она может служить бесконтактным ключом, предназначенным для замыкания или размыкания цепи. Импульс напряжения на выходе такой схемы появится только в том случае, если на оба входа будут поданы отрицательные импульсы ( $I$ ). В противном случае выходные зажимы будут шунтированы весьма малым прямым сопротивлением диодов и выходного импульса не будет ( $0$ ).

Собирательная схема (элемент ИЛИ) показана на рис. 5-18, б. Подача сигнала  $I$  на какой-либо из входов открывает соответствующий диод. Через сопротивление  $r$  будет

проходить ток и на нем будет все напряжение, так как сопротивление диода ничтожно. Следовательно, элемент выдает сигнал  $I$ . При отсутствии сигнала  $I$  на всех входах и на выходе будет сигнал  $0$ . Схема потому и называется собирательной, что позволяет собирать импульсы (сигналы), поступающие в разное время от нескольких источников.

Схема инвертора (элемент НЕ) показана на рис. 5-19. При отсутствии на входе импульса (сигнал  $0$ ) триод через сопротивление  $r_2$  заперт положительным напряжением смещения  $E_c \approx 3$  В и потенциал на выходе практически равен потенциалу верхнего зажима  $B$  ( $\varphi_B \approx -12$  В), т. е. выходной сигнал  $I$ . При подаче на вход сигнала  $I$  триод отпирается и потенциал коллектора становится примерно равным нулю — выходной сигнал  $0$ . Таким образом, элемент НЕ изменяет входной сигнал на противоположный выходной, т. е.  $I$  на  $0$  и  $0$  на  $I$ .

Триггером (рис. 5-20) называется устройство, в котором под действием внешнего импульса происходит скачкообразный переход из одного устойчивого состояния

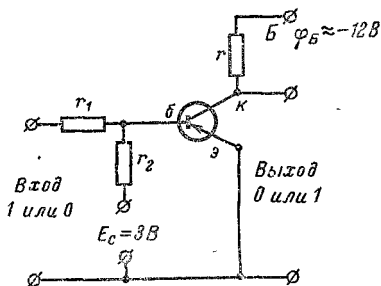


Рис. 5-19. Схема инвертора (элемент НЕ).

в другое устойчивое состояние. При каждом из этих состояний один из триодов пропускает ток, а другой нет.

Управляющие импульсы подаются или по отдельным входным цепям, или на объединенную входную цепь с двумя ответвлениями с включенными в них диодами  $D_1$  и  $D_2$  (триггер со счетным входом); состояние триггера изменяется на противоположное при воздействии каждого входного сигнала.

Допустим, в начальный момент лампа  $L_1$  открыта, а лампа  $L_2$  заперта (рис. 5-20). Анодное напряжение  $U_{a2} = U_{\text{вых}}$  имеет наибольшее значение. Напряжение на сетке первой лампы  $U_{c1} = I_1 r_{c1} - U_{c0}$  положительно, так как ток  $I_1$  сравнительно велик. Напряжение на сетке второй лампы  $U_{c2}$  отрицательно, так как ток  $I_2$  мал и лампа  $L_2$  заперта. При появлении на сетке второй лампы положительного импульса напряжения лампа отпирается, появляется анодный ток  $I_{a2}$ , анодное напряжение  $U_{a2}$  резко уменьшится, уменьшится и ток  $I_1$  в сопротивлении  $r_{c1}$ . Следовательно, напряжение  $I_1 r_{c1}$  станет малым и лампа  $L_1$  заперется.

Наличие обратной связи обеспечивает скачкообразное отпирание и запираание ламп. Для перехода схемы в начальное состояние необходим новый пусковой импульс. Выходное напряжение имеет кривую прямоугольной формы (рис. 5-20, в). Триггер применяется в качестве счетного или запоминающего элемента. Условное обозначение триггера показано на рис. 5-20, г.

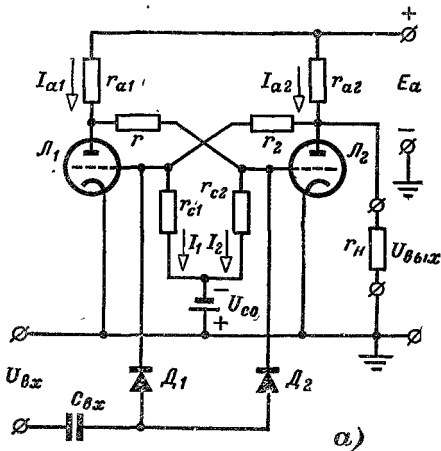
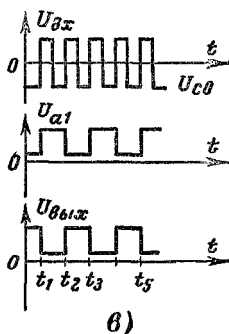
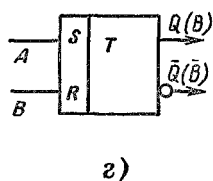
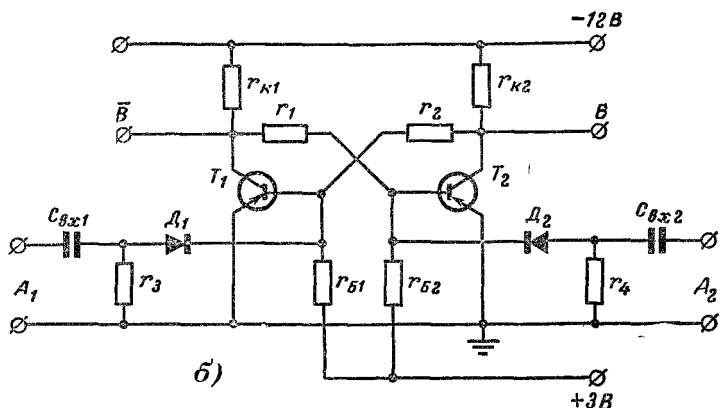


Рис. 5-20. Триггер на электронных лампах (а); обозначение жений (в);

Рис. 5-20. Триггер на электронных лампах (а); обозначение жений (в);

Кроме рассмотренного триггера, на электронных лампах применяются триггеры на полупроводниковых приборах (рис. 5-20, б). Допустим, что в начальный момент триод  $T_1$  открыт, а триод  $T_2$  заперт. Потенциал коллектора  $T_1$  близок к нулю. Сопротивления делителя  $r_1$  и  $r_{B2}$

обеспечивают базе  $T_2$  положительный потенциал, так что триод  $T_2$  заперт. Потенциал коллектора  $T_2$  отрицателен, и в базе  $T_1$  через резистор  $r_2$  идет ток, поддерживающий первый триод открытым.



лампах (а) и на полупроводниковых триодах (б); графики напряжения триггера на схемах (з).

При положительном импульсе на базе  $T_1$  триггер опрокидывается в другое устойчивое состояние, при котором  $T_1$  — закрыт, а  $T_2$  — открыт.

Такой же импульс, поданный на вход  $B$ , возвращает триггер в начальное состояние.

Первому состоянию триггера присваивают значение 1, а второму состоянию значение 0.

Выходной сигнал  $Q$ , снимаемый с коллектора  $T_2$  при состоянии триггера  $T_2$  1 является отрицательным потен-

циалом, а при состоянии 0 примерно равным нулю. Одновременно с коллектора  $T_1$  можно снять инверсный сигнал  $\bar{Q}$  (по отношению к сигналу  $Q$ ).

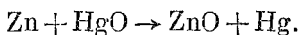
Вход  $A$  соответствует записи 0, вход  $B$  — записи 1 (рис. 5-20,  $z$ ).

### б) Опорные элементы

Опорными элементами называются источники образцовой э. д. с. В качестве опорных элементов применяются ртутно-цинковые элементы, например типа РЦ-85, и кремниевые стабилитроны.

Активная масса положительного электрода ртутно-цинкового элемента состоит из окиси ртути с добавлением графита, а активная масса отрицательного электрода из порошкообразного цинка — с добавлением ртути. Первая из них запрессовывается в корпус, а вторая — в крышку. Между корпусом и крышкой расположена пористая бумага, пропитанная электролитом (раствор едкого кали с окисью цинка).

Химическая реакция протекает по уравнению



Напряжение элемента  $U \approx 1,3 \text{ В}$  при токе нагрузки в несколько десятков миллиампер сохраняется стабильным не меньше года.

Внутреннее сопротивление элемента примерно  $10 \text{ Ом}$ , масса примерно  $40 \text{ г}$ , диаметр  $30 \text{ мм}$ , высота  $14 \text{ мм}$ .

Кремниевые стабилитроны представляют собой диоды, изготовленные по специальной технологии. При включении их в цепь в обратном направлении (рис. 5-21) при определенных значениях входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  остается неизменным при изменении тока в известных пределах (рис. 5-21). Если мощность, выделяемая на диоде, не превышает допустимой, то срок службы кремниевого стабилитрона исчисляется

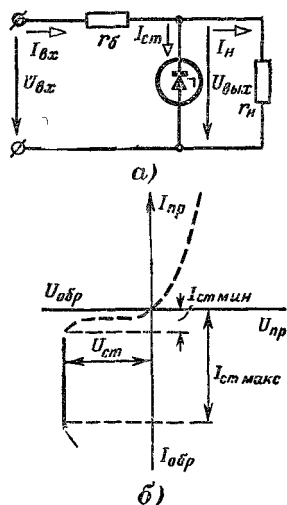


Рис. 5-21. Схема включения (а) и вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона (б).

есятками тысяч часов. Стабилитроны применяются для периодической калибровки источников питания измерительных цепей.

### в) Генераторы тактовых импульсов

Эти генераторы применяются для получения импульсов тока, поступающих в устройства управления цифровых приборов. В зависимости от типа применяемых элементов

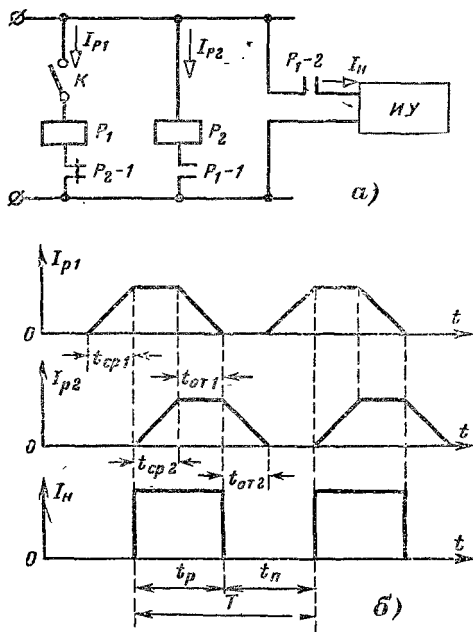


Рис. 5-22. Схема двухрелейного генератора тактовых импульсов (а); графики токов (б).

их делят на релейные, электронно-ламповые, транзисторные, с механическими прерывателями и др.

Схемы выполнения генераторов тактовых импульсов различны. Одной из возможных схем является схема, основанная на использовании тиратронного генератора пилообразного напряжения (§ 11-8 и рис. 11-15).

На рис. 5-22, а в качестве примера приведена схема двухрелейного импульсного генератора.

После замыкания ключа  $K$  в цепи обмотки реле  $P_1$  оно срабатывает и замыкает нормально открытые контакты  $P_1 = 1$  и  $P_1 = 2$ , вследствие чего в цепи исполнительного устройства ИУ проходит ток  $I_H$ . Замыкание контактов  $P_1 = 1$  вызывает срабатывание реле  $P_2$  и размыкание его контактов  $P_2 = 1$  прекращение тока в реле  $P_1$ , что вызывает размыкание контактов  $P_1 = 1$  и  $P_1 = 2$ , прекращение тока  $I_H$  и возвращение схемы в исходное положение.

Из диаграммы (рис. 5-22, б) следует, что период импульсов  $T$  равен сумме длительности импульса  $t_p$  и длительности паузы  $t_{п}$ , т. е.

$$T = t_p + t_{п};$$

причем длительность импульса  $t_p$  равна времени срабатывания  $t_{ср2}$  и времени отпущения реле  $t_{отп1}$ , а длительности паузы  $t_{п}$  равна времени отпущения реле  $t_{отп2}$  и времени срабатывания реле  $t_{ср1}$ .

Частота импульсов

$$f = 1/T = 1/(t_p + t_{п}).$$

### г) Генераторы ступенчатого и линейно-изменяющегося напряжения

В цифровых приборах с число-импульсным кодированием применяются генераторы со ступенчато-изменяющимся напряжением.

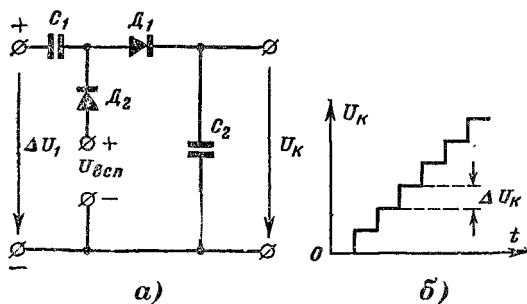


Рис. 5-23. Схема получения ступенчатого напряжения (а) и его график (б).

щимся напряжением. Одна из возможных схем получения ступенчатого напряжения дана на рис. 5-23. При подаче на входные зажимы схемы тактовых импульсов

$\Delta U_1$  конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  заряжаются, так как диод  $D_1$  открыт, а диод  $D_2$  закрыт. Напряжения на двух последовательно соединенных конденсаторах распределяются обратно пропорционально их емкостям. Так как емкость  $C_1$  значительно меньше емкости  $C_2$ , то приращение напряжения на выходных зажимах  $\Delta U_k$  при подходе очередного импульса будет незначительным. В промежутке между импульсами диод  $D_1$  заперт и конденсатор  $C_2$  сохраняет свой заряд, а диод  $D_2$  открыт, так что конденсатор  $C_1$  разряжается до напряжения, равного напряжению на конденсаторе  $C_2$ . Вспомогательное напряжение  $U_{всп}$  обеспечивает постоянство ступенек

$$\Delta U_k = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \Delta U_i.$$

Генераторы линейно-изменяющегося пилообразного напряжения основаны на заряде или разряде конденсатора. Одна из упрощенных схем генератора рассмотрена в § 11-8.

#### д) Генераторы образцовой частоты

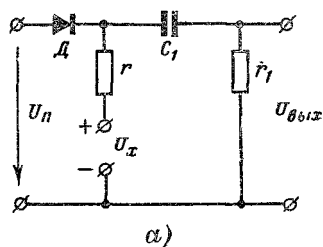
В цифровых приборах в качестве генераторов образцовой частоты применяются генераторы гармонических колебаний, или с кварцевой стабилизацией, или с параметрической стабилизацией (обусловленной качеством элементов колебательного контура и их специального монтажа). Основным требованием, предъявляемым к генераторам образцовой частоты, является стабильность их частоты, так как при недостаточной стабильности возникает одна из составляющих погрешностей прибора.

#### е) Сравнивающие устройства

Сравнивающее устройство  $СУ$  предназначено для сравнения измеряемого напряжения  $U_x$  с образцовым напряжением  $U_0$  и формированием при их равенстве сигналов управления.

На рис. 5-24, а дана одна из простейших схем сравнивающего устройства (нуль-органа). Она состоит из диода  $D$ , цепочки  $C_1 r_1$  и резистора  $r$ . Измеряемое напряжение  $U_x$  для диода является запирающим, а пилообразное напряжение, изменяющееся пропорционально времени ( $U_{п} \equiv$

$\equiv t$ ), — прямым. Поэтому при  $U_{п} < U_x$  (рис. 5-24, б) ток через диод не проходит. В момент  $t_1$  при  $U_{п1} = U_x$



напряжения на выходе  $U_{\text{вых}} = 0$ .

С момента отпираания диода напряжение  $U_{п}$  будет приложено к ветви  $C_1 r_1$ , и на выходных зажимах появится импульс напряжения. Импульс с выхода нуля-органа поступает на усилитель и усиливается до значения, необходимого для срабатывания управляющего устройства УУ, которым может служить, например, триггер. Управляющее устройство фиксирует момент срабатывания СУ и формирует сигнал, воздействующий на работу других элементов цифрового прибора.

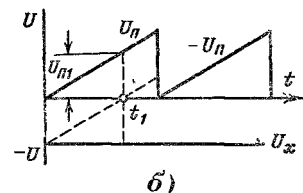


Рис. 5-24. Схема нуля-органа (а) и его временная диаграмма (б).

К сравнивающему устройству предъявляется ряд требо-

ваний, главные из которых: высокая чувствительность, большое входное сопротивление, быстродействие и стабильность в работе.

### ж) Счетчики импульсов

Счетчики предназначены для подсчета импульсов, определяющих значение измеряемой величины.

На рис. 5-25, а показана структурная схема двоичного счетчика, который состоит из четырех последовательно соединенных триггеров (тетрада и четверка).

Как известно, триггер имеет два устойчивых состояния. При одном из них, называемом нулевым или исходным, на выходе  $Q$  (рис. 5-25, а) напряжение примерно равно нулю, а на другом выходе  $\bar{Q}$  напряжение примерно равно напряжению источника питания  $U_{и.п.}$ . Назовем такое состояние триггера 0. При другом из устойчивых состояний триггера, называемом единичным (состояние 1), на его выходе  $Q$  будет отрицательное напряжение, примерно равное  $-U_{и.п.}$ , а на выходе  $\bar{Q}$  — напряжение, примерно равное нулю.



Входные импульсы поступают только на первый триггер  $Tg1$ , причем каждый из них изменяет его состояние. Каждый из следующих триггеров изменяет свое состоя-

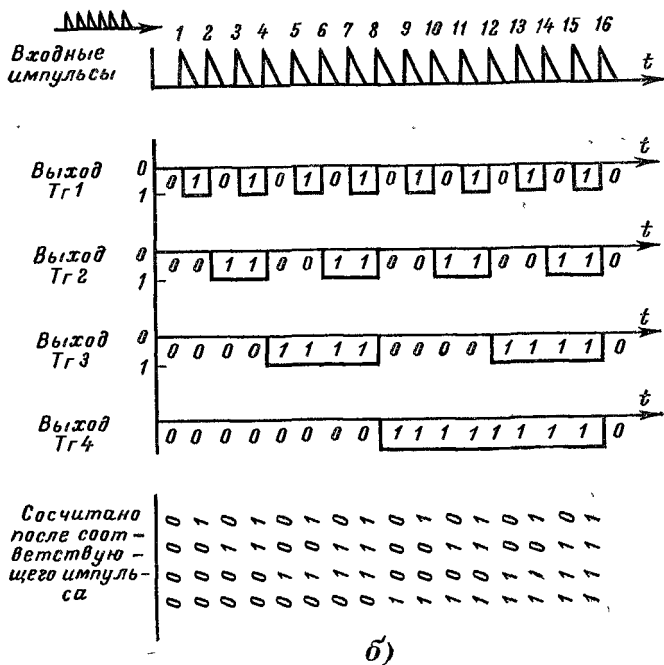
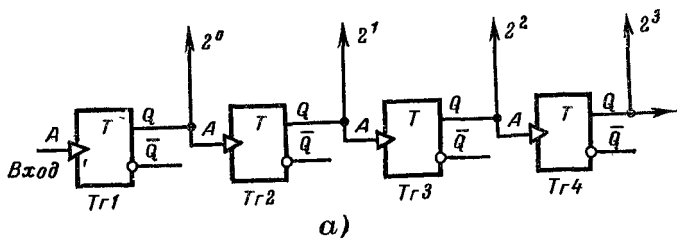


Рис. 5-25. Схема двоичного счетчика на триггерах (а); временная диаграмма и двоичная запись (б).

ние только при положительном импульсе на выходе предыдущего триггера.

Например (рис. 5-25, б), при воздействии первого входного импульса  $Tg1$  из нулевого состояния перебра-

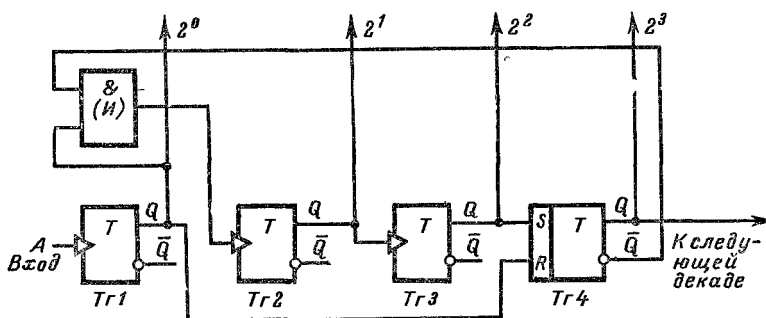
сбывается в состояние единичное, а  $T_{22}$  не изменяет своего состояния, так как на его вход поступает отрицательный импульс с  $T_{21}$ . Второй входной импульс возвращает  $T_{21}$  в исходное состояние и положительным импульсом переключает  $T_{22}$  в состояние 1. Третий входной импульс переводит  $T_{21}$  в состояние 1 и не влияет на  $T_{22}$ . Четвертый импульс переключает триггеры  $T_{21}$  и  $T_{22}$  в исходные состояния, при этом  $T_{22}$  положительным импульсом переключает  $T_{23}$  в состояние 1.

Из временной диаграммы (рис. 5-25, б) нетрудно установить, что  $T_{21}$  перебрасывается каждым входным импульсом,  $T_{22}$  — после каждых двух входных импульсов,  $T_{23}$  — после каждых четырех, а  $T_{24}$  — после восьми импульсов. Сочетание потенциалов на выходах триггеров представляет двоичным кодом число сосчитанных входных импульсов. На временной диаграмме показаны процесс счета и двоичная запись сосчитанных импульсов внизу диаграммы и десятичная запись входных импульсов вверху ее. После 16-го импульса триггеры возвращаются в исходное состояние, и затем счет будет повторяться, так что емкость тетрады равна 15.

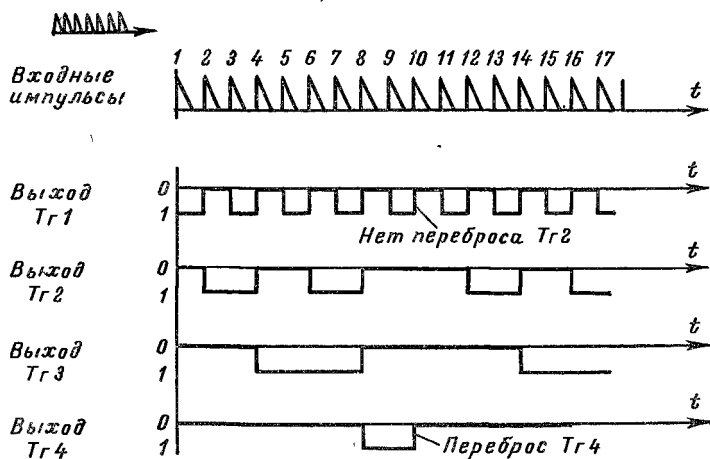
На рис. 5-26, а показана структурная схема одной триггерной счетной четверки двоично-десятичного счетчика. Она соответствует одному разряду десятичного числа, т. е. декаде, которая выполняет в двоичном коде счет чисел (0—9) своего разряда десятичного числа. Таким образом, схема триггерной четверки двоично-десятичного счетчика должна обеспечить возвращение всех триггеров в исходное нулевое состояние после подачи на вход десятого импульса (рис. 5-26, б).

Пересчет на 10 обеспечивается применением цепи обратной связи. Для этой цели перед входом  $T_{22}$  установлен элемент & (И), выполняющий роль бесконтактного ключа-клапана (§ 5-8, а), управляемого выходным потенциалом  $T_{24}$  (выполнен без счетного входа). Управляющий сигнал подается на клапан с инверсного выхода  $\bar{Q}$  триггера  $T_{24}$ , так как этот сигнал, имея значение 1, открывает клапан, чему соответствует состояние 0 триггера  $T_{24}$ . До восьмого импульса рассматриваемая схема ведет себя (рис. 5-26, б) так же, как и двоичный счетчик, так как клапан открыт, а  $T_{24}$  еще не действует. Импульсы от  $T_{21}$ , поступающие на вход 0 триггера  $T_{24}$ , в этот период не действуют на него, так как он находится в состоянии 0. Восьмой импульс переводит  $T_{24}$  в состояние 1, и клапан

закрывается. Девятый импульс вызывает переход  $T_{21}$  из состояния 0 в состояние 1. При десятом импульсе  $T_{21}$  перебрасывается в состояние 0,  $T_{22}$  не перебрасывается



а)



б)

Рис. 5-26. Декада двоично-десятичного счетчика.

а — схема; б — временная диаграмма.

из-за закрытого клапана, а  $T_{24}$  перебрасывается в состояние 0, и вся триггерная четверка переходит в исходное состояние. Одновременно возникает импульс на входе 1-го триггера следующей четверки (декады).

### з) Шифраторы и дешифраторы

Шифраторами и дешифраторами называются преобразователи одних кодов в другие. Шифраторами обычно называются преобразователи десятичного кода в двоичный,

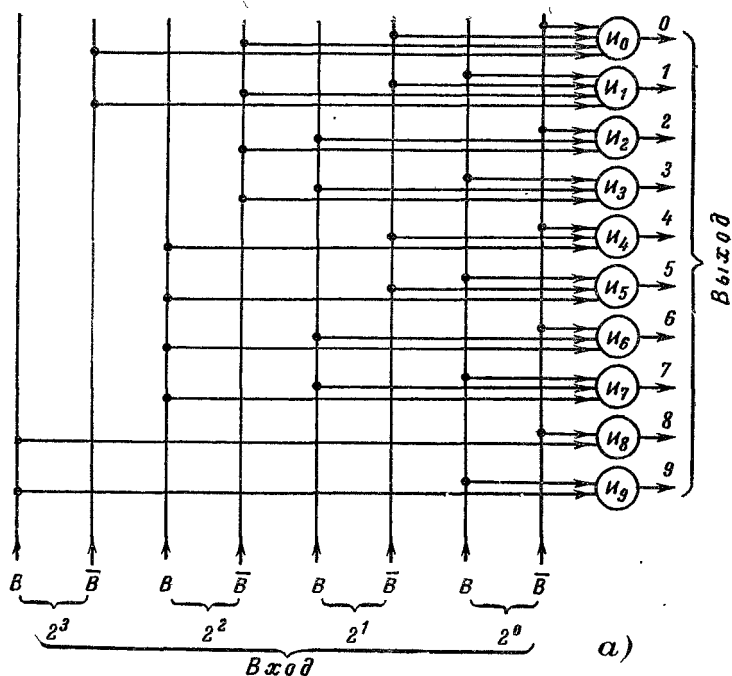
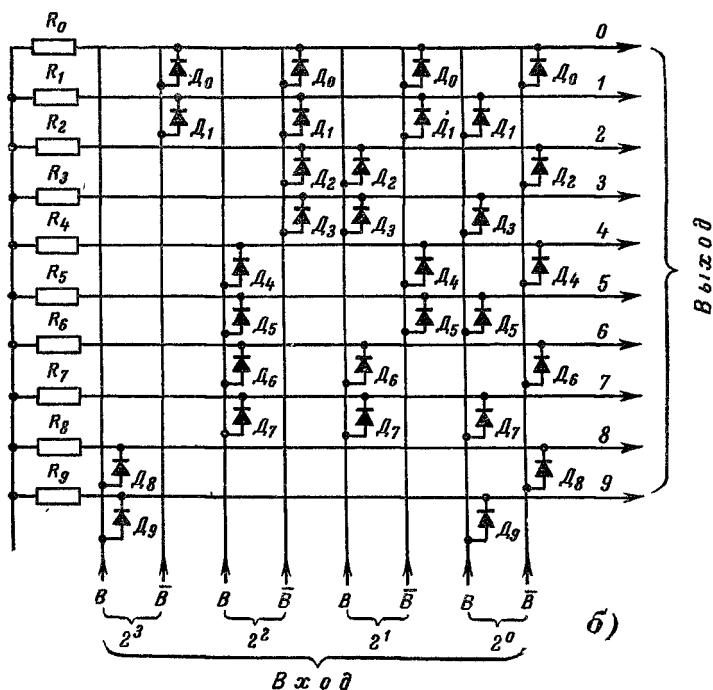


Рис. 5-27. Декада двоично-  
а — функциональная схема;

а дешифраторами — преобразователи двоичного кода в десятичный.

На рис. 5-27 даны функциональная и принципиальная схемы одной декады двоично-десятичного дешифратора для кода 8—4—2—1. Число декад в дешифраторе равно числу десятичных разрядов кода. Дешифратор преобразует число, выраженное в двоичной системе, определяемое положением триггеров, в напряжение на том из десяти выходов, номер которого в десятичной системе соответствует числу, поданному на вход дешифратора.

Например, при подаче на вход числа 0001 напряжение появится на выходе 1. Выходы дешифратора соединяются с цифровым отсчетным устройством (§ 5-8, и), которое воспроизводит изображение десятичных чисел. Управление ими требует десяти проводов на каждый десятичный разряд.



десятичного дешифратора.

б — принципиальная схема.

На вход дешифратора подаются одновременно прямые ( $B$ ) и инверсные ( $\bar{B}$ ) сигналы для каждого двоичного разряда. При каждой комбинации входных потенциалов возбуждается лишь одна выходная шина. Эта шина определяется совпадением отрицательных потенциалов на всех входах соответствующей схемы И. Вход схемы И соединяется с шиной  $B$  данного разряда, если в кодовой комбинации числа  $M$  этот разряд имеет значение 1, а при значении 0 вход соединяется с шиной  $\bar{B}$ . Схемы совпадения (И) имеют разное число входов (рис. 5-27, а), например И<sub>0</sub>

и  $I_1$  по четыре входа, а  $I_8$  и  $I_9$  по два входа. Это объясняется следующим. При использовании всех 16 возможных комбинаций четырехразрядного двоичного кода получили бы 16 схем И с четырьмя входами. Так как число возможных комбинаций меньше, то дешифратор можно упростить. Кодовые комбинации цифр от 2 до 7 (табл. 5-1) отличаются тем, что если один из двух средних двоичных разрядов с весами  $2^1$  и  $2^2$  принимает значение 1, то старший разряд с весом  $2^3$  равен 0, так что его можно не учитывать при дешифровке, и схемы совпадения  $I_2$ — $I_7$  получаются с тремя входами. Если старший двоичный разряд кода с весом  $2^3$  имеет значение 1, то это обозначает цифру 8 или 9. Для того чтобы различить их, необходимо знать значение младшего разряда с весом  $2^0$ , так как значения двух других разрядов равны 0 и их не учитывают при дешифровке. Таким образом, схемы  $I_8$  и  $I_9$  имеют только по два входа.

Схемы совпадения И и принадлежащие им диоды  $D$  и сопротивления  $R$  на обеих схемах имеют одинаковые индексы  $M$ .

Схемы дешифраторов, аналогичные представленной на рис. 5-27, б, получили название диодных матриц.

Рассмотрим еще в качестве примера схему одного блока простейшего дешифратора, управляющего одной декадой отсчетного и цифрового устройства (§ 5-8, и), применяемого в электромеханических цифровых приборах. Блок дешифратора (рис. 5-28) в основном состоит из четырех реле, десяти ламп и десяти диодов. При загорании той или иной лампы на экране прибора появляется цифра, соответствующая индексу лампы.

На вход блока дешифратора поступает код, элементы которого имеют веса  $5-2-1-1^1$ . В исходном положении блока дешифратора (рис. 5-28) при отсутствии сигналов на входных зажимах управляющей цепи от вспомогательного источника питания проходит ток через ключ  $K_1$ , лампу  $L_0$ , ключи  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_4$ , при этом горит лампа  $L_0$  и на экране прибора видна цифра 0.

При поступлении элемента кода с весом 1 срабатывает реле 3, переключающее контакты 3 в положение, противоположное указанному на рис. 5-28, и ток проходит через лампу  $L_1$ , а на экране появляется цифра 1.

При поступлении на вход дешифратора кода с весами 5 и 2, соответствующими цифре 7, срабатывает реле 1 и 2, которые перебрасывают свои контакты, и загорается  $L_7$ .

Читателю предлагается проследить за положением ключей и прохождением тока по цепи при подаче кода, соответствующего цифре 6; кроме того, предлагается проверить, не будет ли ток проходить и по другим лампам при указанном коде, но при отсутствии вентилей.

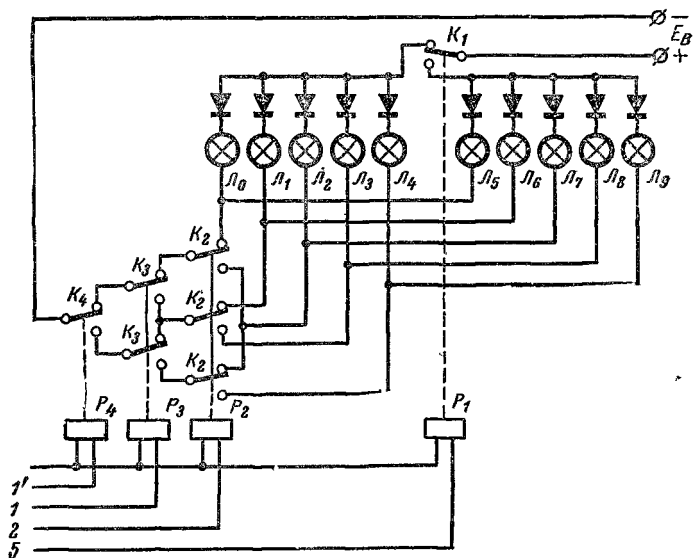


Рис. 5-28. Схема одного блока дешифратора.

Вентили в рассматриваемой схеме устраняют появление паразитных связей.

Для трехразрядного отсчетного устройства, дающего возможность регистрировать числа от 0 до 999, требуются три блока дешифратора.

### и) Цифровые отсчетные устройства

Цифровые отсчетные устройства предназначены для визуального наблюдения результатов измерения в цифровой форме. Наиболее распространенными из них являются проекционные с торцевой подсветкой и на цифровых индикаторных лампах.

Проекционное устройство (рис. 5-29) состоит из ламп  $a_1, a_2, \dots, a_{10}$ , блока конденсаторов  $b$ , диафрагмы  $d$ , диапазо-

тивов с изображением цифр  $\beta$ , блока объективов  $z$  и экрана  $\varepsilon$  из матированного органического стекла, на который проектируются цифры. Для одного десятичного разряда чисел применяется десять ламп.

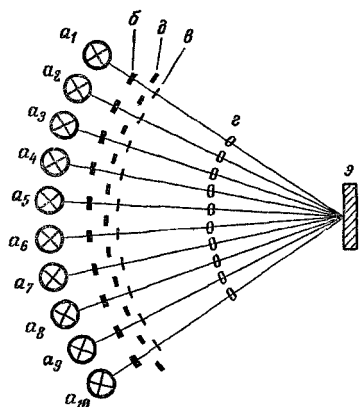


Рис. 5-29. Проекционное устройство.

Для каждого десятичного разряда чисел применяется десять ламп. Оптические оси проекторов, образованных лампами, конденсорами и объективами, пересекаются в центре экрана. В зависимости от значения измеряемой величины загорается та или иная лампа и на экран проектируется соответствующая ей цифра. Для каждого разряда числа необходим один экземпляр рассмотренного устройства.

Отсчетное устройство с торцевой подсветкой (рис. 5-30) состоит из пакета пластин из органического стекла. Каждая пластина может подсвечиваться в торец своей лампой. Вследствие подсветки той или иной пластины возникает эффект свечения благодаря полному отражению света от внутренних плоскостей пластины, и, если смотреть спереди, становится видимой цифра, выгравированная на поверхности подсвеченной пластины. При этом неподсвеченные пластины остаются прозрачными и выгравированные на них цифры не видны.

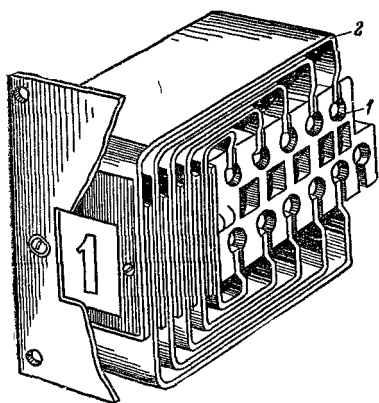


Рис. 5-30. Отсчетное устройство с торцевой подсветкой, источником света (1) и светопроводом (2).

Цифровая индикаторная газоразрядная лампа (рис. 5-31) имеет десять проволочных катодов в форме цифр от 0 до 9 и один анод в виде сетки. При наличии напряжения между анодом и одним из катодов наблюдаются разряд



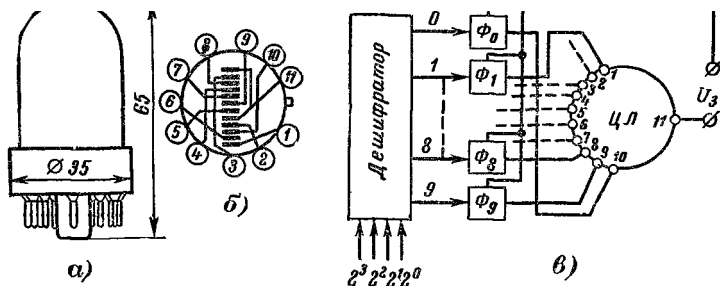


Рис. 5-31. Индикаторная лампа ИИ-1.

а — внешний вид; б — цоколевка; в — схема включения.

и свечение соответствующей цифры. Отсчет производится через стеклянный торец лампы. Лампа имеет цоколь с одиннадцатью штырьками, соединенными с ее электродами.

### 5.9. ЦИФРОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ, ЧАСТОТОМЕРЫ, ФАЗОМЕТРЫ

#### а) Вольтметры

Характерным представителем электромеханических цифровых вольтметров, работающих на принципе поразрядного уравнивания, является вольтметр завода «Вибратор» типа Щ1311 (рис. 5-32).

Вольтметр предназначен для измерения постоянного напряжения и имеет четыре предела измерения: 0,999—9,99—99,9—999 В.

Измеряемое напряжение  $U_x$  при помощи входного делителя делится в отношении 1/1; 1/10; 1/100; 1/1 000. Напряжение на выходе делителя  $U_x$  измеряется при помощи компенсатора. Компенсирующее напряжение  $U_K$  подбирается переключателем сопротивлений  $R_3—R_{14}$  контактами двухобмоточных реле  $P_3—P_{14}$ . Включение реле выполняется электромеханическим программирующим переключателем. При движении щетки переключателя происходит поочередное соприкосновение ее с той или иной ламелью ( $L'_3, L'_3, L'_4$  и т. д.) переключателя и включение соответствующего реле. Напряжение  $U_x$  сравнивается с  $U_K$  нуль-органом, на входе которого включено реле РП-5.

Если при включении какого-либо реле  $P_n$  напряжение  $U_k < U_x$ , то контактор реле РП-5 будет в нижнем положении и реле  $P_n$  остается включенным. Если же  $U_k > U_x$ , то контактор РП-5 переключится в верхнее положение

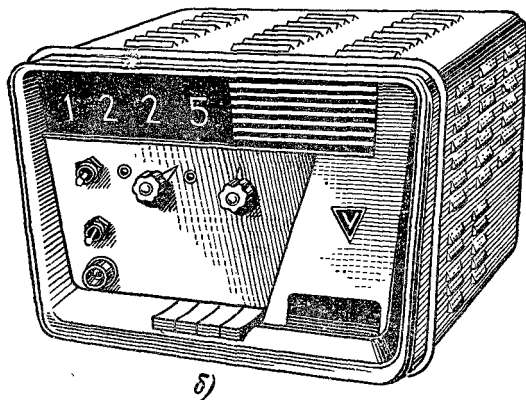
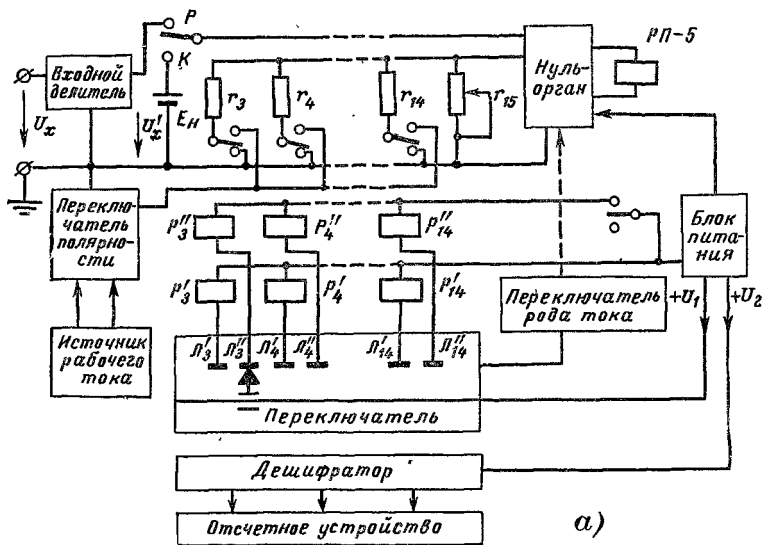


Рис. 5-32. Структурная схема цифрового вольтметра типа Щ1314 (а) и его внешний вид (б).

ние, так что при перемещении щетки на следующую лямель реле  $P_n$  возвратится в исходное положение, отключив соответствующее сопротивление.

После обхода всех реле будет достигнута компенсация  $U_x$  и  $U_k$ , и в соответствии с напряжением  $U_x$  часть реле будет включена, а другая выключена. Реле  $P_3$ — $P_{14}$  воздействуют на дешифратор, который управляет отсчетным устройством проекционного типа.

Прибор имеет два режима работы: разовые и периодические измерения. Выбор режима производится клавишным переключателем рода работы.

Сопротивление вольтметра зависит от предела измерения и изменяется от 100 кОм до 100 МОм. Основная погрешность его  $\pm 0,1\%$  + единица младшего разряда. Время одного измерения 1,5 с. Интервал между измерениями можно регулировать от 3 до 30 с.

Цифровые вольтметры типа Ш1411 отличаются от рассмотренных большей точностью (основная погрешность их не превышает  $\pm 0,05\%$ ) и наличием четвертого разряда в отсчетном устройстве.

В качестве примера электронных цифровых вольтметров рассмотрим вольтметр типа В7-8, работающий на время-импульсном методе преобразования измеряемой величины. Вольтметр предназначен для измерений постоянных и переменных напряжений частотой от 20 Гц до 200 кГц и имеет три предела измерения: 10—100—1 000 В. Основная погрешность его при измерении постоянного напряжения составляет примерно  $\pm (0,1-0,3\%)$ , а при измерении переменного напряжения с частотой от 20 Гц до 20 кГц примерно  $\pm (0,3-0,5\%)$ .

Продолжительность цикла измерения не превышает 0,03 с.

Вольтметр питается от сети с частотой 50 Гц, напряжением 220 В, мощность потерь в нем не превышает 145 Вт.

Измеряемое напряжение подводится к делителю напряжения входного устройства ВУ (рис. 5-33), а затем к усилителю постоянного тока УПТ. При измерении переменного напряжения оно после делителя преобразуется в преобразователе Пр в постоянное напряжение, которое и поступает на УПТ. В усилителе происходит усиление напряжения и преобразование его в симметричное. Два выхода УПТ соединены с входными зажимами сравнивающих устройств СУ1 и СУ2, так что один входной сигнал УПТ подается на СУ1, а другой на СУ2. Кроме того, на СУ1 и СУ2 подается линейно изменяющееся напряжение от генератора компенсирующего напряжения ГКН.

В начальный момент  $t_1$  сравнения измеряемого напряжения с компенсирующим напряжением и в конце этого процесса сравнения  $t_2$   $СУ1$  и  $СУ2$  выдают два импульса. Первый из них отпирает генератор образцовой частоты  $ГОЧ$ , а второй запирает его. В течение времени  $t_x = t_2 - t_1$  пропорционально измеряемому напряжению  $U_x$  на счетное устройство  $СЧУ$  поступают импульсы от  $ГОЧ$ . Число

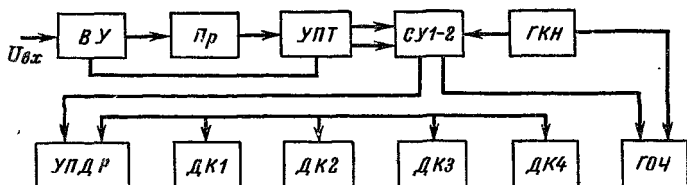


Рис. 5-33. Структурная схема цифрового вольтметра типа В7-8.

этих импульсов, пропорциональное величине измеряемого напряжения, фиксируется  $СЧУ$ . Это устройство состоит из декад  $ДК1—ДК4$  и устройства выбора полярности и дополнительного разряда  $УПДР$  (рис. 5-33).

При измеряемом напряжении, превышающем 10 В, четырех декад (9,999) становится недостаточно, и импульсом с выхода старшей декады включается дополнительный разряд  $УПДР$ .

Очередность срабатывания  $СУ1$  и  $СУ2$  определяется полярностью постоянного измеряемого напряжения, и отрицательная полярность его на отсчетном устройстве вольтметра отмечается знаком минус.

### б) Частотомеры и фазометры

Структурная схема цифрового частотомера с частотно-импульсным кодированием для измерения мгновенного значения частоты дана на рис. 5-34.

Напряжение, частота  $f_x$  которого измеряется, подводится к формирующему устройству  $ФУ$ , в котором синусоидальное напряжение преобразуется в импульсы прямоугольной формы, с периодом, соответствующим периоду подведенного напряжения. Электронный ключ  $ЭК$  открывается первым положительным импульсом и запирается вторым импульсом, поступающим от формирова-

теля импульсов, так что он открыт в течение времени  $T_x$ , соответствующего периоду измеряемого напряжения. В течение периода  $T_x$  от генератора стабильных импульсов ГСИ через ключ ЭК на счетчик импульсов СИ поступают импульсы стабильной частоты  $f_0$ . Их число  $N$ , пропорциональное периоду  $T_0$  ( $N = f_0 T_x$ ), фиксируется СИ и

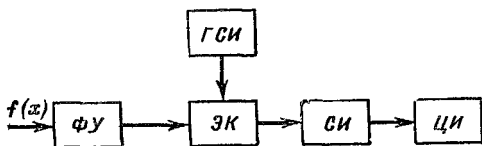


Рис. 5-34. Структурная схема цифрового частотомера.

отсчитывается на отсчетном устройстве — цифровом индикаторе ЦИ.

На рис. 5-35 дана структурная схема электронного цифрового фазометра, работающего на том же принципе, что и рассмотренный частотомер.

Фазометр имеет два формирующих устройства  $\Phi У_1$  и  $\Phi У_2$ . На первое из них подается испытуемое напряжение  $U_x$ , на второе — опорное  $U_0$ . Передний фронт прямоугольного импульса, соответствующего опорному напряжению  $U_0$ , открывает ЭК, и от ГСИ на СИ начинают поступать импульсы частотой  $f_0$ . Они продолжают

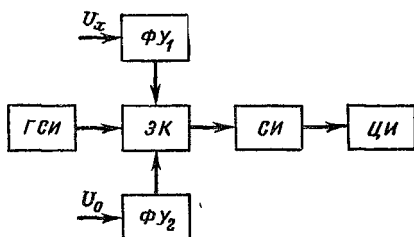


Рис. 5-35. Структурная схема цифрового фазометра.

продолжаться до тех пор, пока передний фронт прямоугольного импульса, соответствующего испытуемому напряжению  $U_x$ , не закроет ЭК. Таким образом, число импульсов  $N$ , пропорциональное сдвигу фаз между напряжениями  $U_x$  и  $U_0$ , фиксируется счетчиком импульсов и отсчитывается на ЦИ.

Наряду с частотомерами и фазометрами для измерений мгновенных значений применяются цифровые приборы для измерения величин по их средним значениям.

**5-10. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ  
В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА  
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ И В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ**

Токи и напряжения, которые приходится измерять, весьма различны по модулю, форме кривой мгновенных значений и частоте. Различными могут быть требования и к точности измерений. Разнообразны и условия, в которых производятся измерения. Поэтому разнообразны приборы и методы измерений токов и напряжений.

Постоянные токи от 1 мкА до 6 кА и напряжения от 1 мВ до 1,5 кВ обычно измеряют приборами магнитоэлектрической системы, представляющими собой измерительные механизмы той же системы с шунтом или добавочным сопротивлением. Амперметры и вольтметры указанной системы изготовляются классов точности 0,1 — 2,5. Большая точность измерений постоянных токов и напряжений (погрешность до 0,01 %) достигается применением компенсационных методов и цифровых вольтметров.

Постоянные токи и напряжения меньше 1 мкА или 1 мВ измеряются магнитоэлектрическими гальванометрами или гальванометрическими усилителями, а больше 6 кА или 1,5 кВ — с применением трансформаторов постоянного тока. Большие постоянные токи порядка килоампер можно измерять также измерительными устройствами с датчиками Холла. В высоковольтных цепях постоянного тока для измерения напряжения применяются также вольтметры электростатической системы с номинальным напряжением до 100 кВ.

В низковольтных (до 500 В) цепях переменного тока промышленной частоты (50 Гц) измерение небольших и средних токов ( $10^{-2}$ — $2 \cdot 10^2$  А) и напряжений ( $10^{-2}$ — $5 \cdot 10^2$  В) производится приборами непосредственной оценки различных систем, рассмотренных в гл. 3. Выбор системы определяется предельным значением измеряемой величины, точностью, условиями измерений и свойствами системы.

При измерениях низкой и средней точности применяют приборы электромагнитной системы соответственно классов 1,5—2,5 или 0,2—0,5. Большую точность обеспечивают приборы электродинамической системы классов 0,1 и 0,2.

Если при измерении напряжения энергия потребления вольтметра должна быть мала, то применяются электростатические или выпрямительные вольтметры.

Средние и большие переменные токи измеряют амперметрами, включаемыми через измерительные трансформаторы тока, а малые переменные токи — термоэлектрическими, выпрямительными, электронными и вибрационными гальванометрами. Эти же приборы используют в качестве нулевых индикаторов. Вместо перечисленных гальванометров можно использовать компараторы.

Компаратор — это прибор сравнения, основанный на применении измерительного преобразователя, на который

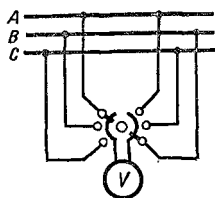


Рис. 5-36. Схема включения вольтметра с переключателем.

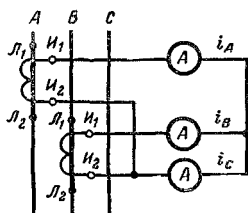


Рис. 5-37. Схема соединения трех амперметров через два трансформатора тока.

одинаково воздействуют переменные и постоянные электрические величины. Установив равенство измеряемой переменной величины с постоянной, последнюю, а следовательно, и первую можно определить с высокой точностью, например, с помощью компенсатора постоянного тока.

Запись токов и напряжений производится самопишущими приборами в цепи постоянного тока — магнитоэлектрической системы, а в цепях переменного тока — ферродинамической системы.

В трехфазных цепях в большинстве случаев ограничиваются измерением одного из линейных токов и одного из линейных напряжений, причем измерения производятся так же, как и в однофазных цепях. В цепях низкого напряжения для измерения трех линейных напряжений иногда применяется один вольтметр с переключателем (рис. 5-36).

Для измерения трех линейных токов в трехфазной трехпроводной цепи с применением трансформаторов тока достаточно иметь два трансформатора (рис. 5-37). Это

непосредственно следует из свойства суммы линейных токов

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Таким образом, сумма двух линейных токов равна третьему линейному току, взятому с обратным знаком, например  $i_A + i_B = -i_C$  (рис. 5-37).

Для измерения трех линейных напряжений трехфазной трехпроводной цепи с применением трансформаторов напряжения достаточно двух трансформаторов, что непосредственно вытекает из свойств суммы линейных напряжений:

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0.$$

Таким образом, сумма двух линейных напряжений равна третьему линейному напряжению, взятому с обратным знаком, например  $u_{AB} + u_{BC} = -u_{CA}$  (рис. 5-38).

Для оценки переменных токов и напряжений используют понятия: 1) действующего (эффективного) значения, определяемого выражением

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad \text{или} \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt};$$

- 2) амплитудного или максимального значения  $I_m$  и  $U_m$  — наибольшими из мгновенных значений за период;  
3) среднего значения за полупериод

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt \quad \text{и} \quad U_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt.$$

При синусоидально-изменяющейся величине коэффициенты формы кривой  $k_\Phi$  и амплитуды  $k_a$  имеют определенные постоянные значения  $k_\Phi = U/U_{cp} = 1,11$  и  $k_a = U_m/U = \sqrt{2} = 1,41$ , поэтому, измерив одно из трех указанных выше значений измеряемой величины, легко определить остальные. Например, если вольтметр изме-



рил действующее значение  $U = 220$  В, то это значит, что  $U_m = 1,41 \cdot 220 \approx 310$  В, а  $U_{\text{ср}} = 220/1,11 \approx 200$  В.

При несинусоидальном напряжении (токе) чем более тупой будет кривая измеряемой величины, тем ближе она будет к прямоугольной форме, при которой  $U_m = U = U_{\text{ср}}$  и  $k_{\text{ф}} = k_{\text{а}} = 1$ , тем ближе к единице будут коэффициенты  $k'_{\text{ф}}$  и  $k'_{\text{а}}$ . Наоборот, чем более острой будет кривая измеряемой величины, тем больше будут ее коэффициенты  $k''_{\text{ф}}$  и  $k''_{\text{а}}$  по сравнению с  $k_{\text{ф}}$  и  $k_{\text{а}}$  для синусоиды.

При несинусоидальной кривой измеряемой величины вольтметры (амперметры) различных систем ведут себя по-разному: 1) у приборов электромагнитной, электродинамической, электростатической, термоэлектрической и частично электронной систем угол поворота определяется действующим значением измеряемой величины; 2) у приборов выпрямительной и частично электронной систем угол поворота определяется средним значением измеряемой величины; 3) у амплитудных вольтметров электронной системы — максимальным значением измеряемой величины.

На шкалах всех вольтметров и амперметров наносятся действующие значения измеряемой величины при синусоидальной форме кривой. Поэтому, например, при включении в цепь с несинусоидальным напряжением вольтметра первой из указанных групп он покажет 220 В, а это означает, что  $U = 220$  В, а  $U_m$  и  $U_{\text{ср}}$  неизвестны; если вольтметр второй группы покажет 220 В, то это означает, что  $U_{\text{ср}} = 220/1,1 = 200$  В, а  $U$  и  $U_m$  неизвестны; наконец, если вольтметр третьей группы покажет 220 В, то это означает, что  $U_m = 310$  В, а  $U$  и  $U_{\text{ср}}$  неизвестны.

Таким образом, при несинусоидальных величинах в зависимости от того, какое значение необходимо определить, следует выбирать прибор соответствующей группы, т. е. системы, иначе полученные результаты могут оказаться неправильными.

#### 5-11. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Входное сопротивление любого измерительного прибора содержит активную, индуктивную и емкостную составляющие. Эквивалентная схема магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических и термоэлектрических приборов дана на рис. 5-39, а электростатических,

электронных и выпрямительных приборов — на рис. 5-39. На этих схемах  $C_1$  и  $C_2$  — емкости входных проводов относительно земли, а  $C_{12}$  — емкость между входными проводами.

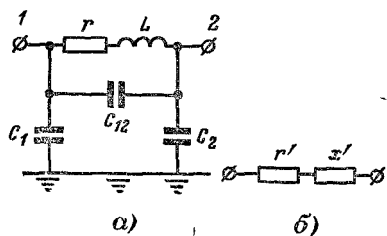


Рис. 5-39. Эквивалентная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схемы прибора.

Сопротивление прибора, с одной стороны, зависит от параметров его эквивалентной схемы, которые имеют разные значения в зависимости от системы и конструкции прибора, с другой стороны, от частоты измеряемого тока. Активное сопротивление увеличивается с увеличением частоты вследствие поверхностного эффекта; индуктивное сопротивление ( $x_L = 2\pi fL$ ) с увеличением частоты также растет, а емкостное сопротивление  $x_C = 1/(2\pi fC)$ , наоборот, уменьшается.

Так, например, электродинамический амперметр на ток  $I_H = 5$  А, имеющий  $L = 25$  мкГ, при  $f_1 = 50$  Гц будет иметь реактивное сопротивление  $x_{L1} = 0,008$  Ом; при  $f_2 = 50$  кГц  $x_{L2} = 8$  Ом, а при  $f_3 = 3$  МГц  $x_{L3} = 800$  Ом.

Вследствие большой индуктивности электродинамические и электромагнитные приборы применяются для измерений в цепях с частотой не выше 8 кГц.

Электростатические вольтметры на напряжение  $U_H = 3$  кВ имеют емкость  $C = 50$  пФ. При частоте  $f_1 = 50$  Гц их реактивное сопротивление  $x_{c1} = 6 \cdot 10^7$  Ом, а при частоте  $f_2 = 5$  МГц  $x_{c2} = 600$  Ом, т. е. применение их при таких высоких частотах невозможно.

Включение измерительного прибора в цепь может изменить эквивалентное сопротивление цепи, режим работы ее, а следовательно, изменить измеряемую величину. Значительное изменение режима работы цепи может про-

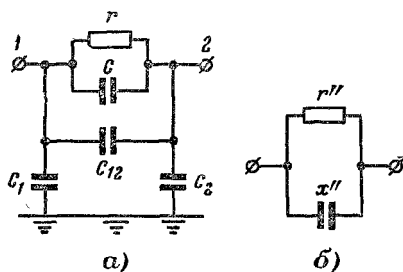


Рис. 5-40. Эквивалентная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схемы прибора.

изойти в связи с явлением резонанса. Например, включение измерительного прибора в контур, настроенный в резонанс, или на зажимы его (рис. 5-41) может расстроить резонанс и резко изменить измеряемую электрическую величину.

При измерениях в цепях высокой частоты следует стремиться к тому, чтобы прибор находился под потенциалом, близким к потенциалу земли, в противном случае неизбежны погрешности измерений из-за влияния токов утечки.

На рис. 5-42 дана неправильная схема включения термоэлектрического амперметра в цепь. При напряжении источника питания 100 В, частоте  $10^8$  Гц и входных

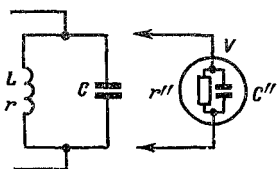


Рис. 5-41. Подключение вольтметра к колебательному контуру.

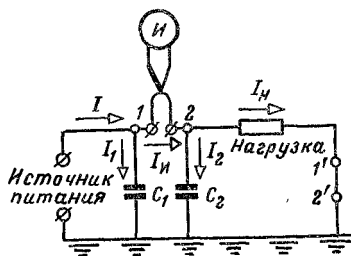


Рис. 5-42. Схема включения термоэлектрического амперметра.

емкостях 1 пФ ток, идущий через каждую из емкостей, будет равен примерно 60 мА. Следовательно, ток амперметра будет на 60 мА меньше тока источника питания и на такую же величину больше тока в нагрузке.

Если включить тот же амперметр между точками 1' и 2', то вследствие ничтожной разности потенциалов между точками включения и землей токи через входные емкости проходить не будут.

Если нельзя включить прибор в участок с низким потенциалом относительно земли, то для уменьшения погрешности измерения можно прибор поместить в металлический экран (рис. 5-43 и 5-44). Соединив экран с одним из зажимов прибора, получим разность потенциалов между прибором и экраном, равную нулю; не будет и тока через входные емкости между прибором и экраном. Поэтому при соединении по схеме, показанной на рис. 5-43, в приборе и нагрузке будет проходить один и тот же ток, а при

соединении по схеме на рис. 5-44 одинаковый ток будет проходить в приборе и источнике питания.

В цепях высокого напряжения независимо от рода тока и частоты следует включать амперметр в участок цепи с потенциалом, равным или близким к потенциалу земли, еще и потому, что в противном случае создается опасность для экспериментатора, могут возникать дополнительные погрешности от электрического поля, создаются неблагоприятные условия для работы изоляции прибора, которая в этом случае должна находиться в соответствии с рабочим напряжением измеряемой цепи.

Погрешности при измерениях в цепях высокой частоты могут происходить не только от влияния параметров прибора на режим работы цепи и изменения значения изме-

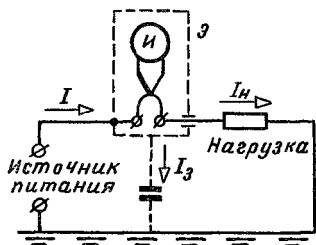


Рис. 5-43. Термоэлектрический амперметр с экраном Э.

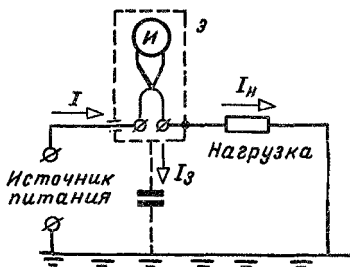


Рис. 5-44. Термоэлектрический амперметр с экраном Э.

ряемой величины, но также и от того, что последняя может измеряться неправильно. В самом деле, если в цепь измеряемого тока включен амперметр, схема которого дана на рис. 5-39, а, то часть измеряемого тока ответвится через емкость  $C_{12}$  и, следовательно, ток, идущий по измерительному механизму (ветвь  $r, L$ ), которым определяется показание амперметра, будет меньше тока, идущего по цепи и подлежащего измерению. Погрешность, вызванная этим обстоятельством, будет увеличиваться с увеличением частоты. Она может быть особенно большой, если частота измеряемой цепи окажется близкой или равной частоте контура  $r, L$  и  $C$  (рис. 5-39, а) амперметра (собственная частота амперметра), что для высокочастотных амперметров иногда имеет место при частоте порядка  $10^9 - 10^{10}$  Гц.

С повышением частоты, а следовательно, с уменьшением длины волны линейные размеры цепей становятся

соизмеримыми с длиной волны. При измерениях токов и напряжений в таких цепях показания приборов зависят от места их расположения в цепи. При измерениях в цепях высокой частоты применяются приборы только специальных конструкций, удовлетворяющие следующим основным требованиям:

1. Принцип работы прибора обеспечивает отсутствие влияния частоты на его показания в рабочем диапазоне частот.

2. Собственные емкость и индуктивность, входные емкости и индуктивности и мощность потерь в приборе должны быть малы.

3. Частота собственных колебаний прибора должна быть сравнительно высока.

4. Линейные размеры прибора должны быть малы по сравнению с длиной волны измеряемой величины.

Чем выше частота, тем труднее изготовить прибор, удовлетворяющий указанным требованиям. Это является одной из причин того, что при частотах выше  $10^9$ — $10^{10}$  Гц измерения тока и напряжения заменяют измерениями сопротивления и мощности. К системам, пригодным для работы при повышенной и высокой частотах, относятся термоэлектрическая, тепловая, электронная, выпрямительная и электростатическая.

## *Глава шестая*

### **ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

#### *А. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ*

##### **6-1. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Сопротивление — один из важнейших параметров электрической цепи. Одни сопротивления сохраняют свои значения в различных условиях, другие, наоборот, изменяются во времени, от температуры, от влажности и т. п. Поэтому при изготовлении электрических машин, аппара-

ратов, приборов, при монтаже и эксплуатации электроустановок необходимо производить измерение сопротивлений. Весьма разнообразны условия, в которых производятся измерения сопротивлений. Также различны требования к точности и скорости измерений.

В некоторых случаях измерение производится в естественных условиях, конкретизировать которые невозможно, в других случаях, наоборот, создаются определенные условия для объекта измерения. По значениям сопротивления делят на три группы: малые (1 Ом и меньше), средние (1—0,1 МОм) и большие (от 0,1 МОм и выше).

При измерении малых сопротивлений на результат измерения влияют сопротивления соединительных проводов, контактов и контактные термо-э. д. с.

При измерении больших сопротивлений необходимо считаться с объемным и поверхностным сопротивлениями и учитывать или устранять влияние температуры, влажности и других причин.

Измерение сопротивлений жидких проводников или проводников, обладающих высокой влажностью, например сопротивлений заземлений, производят на переменном токе, так как применение постоянного тока связано с погрешностями, вызванными явлением электролиза.

Измерение сопротивлений твердых проводников производят на постоянном токе, так как при этом, с одной стороны, исключаются погрешности, связанные с влиянием емкости и индуктивности объекта измерения и измерительной цепи, с другой стороны, появляется возможность применять приборы магнитоэлектрической системы, имеющие высокую чувствительность и точность.

## **6-2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

При измерении малых сопротивлений, например обмоток электрических машин и трансформаторов или коротких проводов, возможно влияние сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов на результат измерения.

Переходным сопротивлением, или сопротивлением на контактах, называют сопротивление, которое встречает электрический ток при переходе с одного проводника на другой. Переходное сопротивление зависит от поверхности соприкосновения, от ее характера и состояния:

гладкая или шероховатая, чистая или загрязненная, наконец, от плотности соприкосновения и силы нажатия.

Для оценки влияния соединительных проводов и контактов на погрешность измерения малых сопротивлений используют схемы рис. 6-1 и 6-2. В первой схеме обозначим показания вольтметра  $U_V$  и амперметра  $I_A$ . При этом искомое сопротивление

$$r'_x = U_V / I_A = r_x + 2r_{\text{пр}} + 2r_{\text{к}},$$

которое представляет собой сумму действительного значения искомого сопротивления  $r_x$ , сопротивления двух

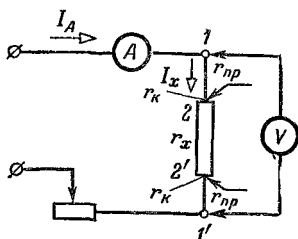


Рис. 6-1. Неправильная схема соединения для измерения малых сопротивлений амперметром и вольтметром.

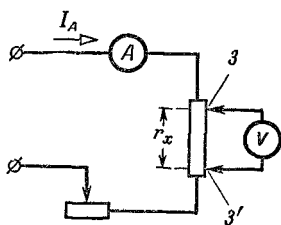


Рис. 6-2. Правильная схема соединения для измерения малых сопротивлений амперметром и вольтметром.

соединительных проводов  $2r_{\text{пр}}$  и переходного сопротивления двух контактов  $2r_{\text{к}}$ .

Допустив, например,  $r_x = 0,1$  Ом, а  $r_{\text{пр}} = r_{\text{к}} = 0,01$  Ом, получим найденное значение  $r'_x = 0,14$  Ом, а погрешность измерения

$$\gamma = \frac{r'_x - r_x}{r_x} \cdot 100\% = \frac{0,14 - 0,1}{0,1} \cdot 100\% = 40\%.$$

Уменьшение искомого сопротивления вызовет увеличение относительной погрешности измерения, обусловленной сопротивлением соединительных проводов и сопротивлением контактов.

Присоединив вольтметр к точкам 2 и 2' (рис. 6-1), т. е. к токовым зажимам, которым измеряемое сопротивление включено в цепь тока, получим другое значение искомого сопротивления

$$r''_x = U''_V / I_A = r_x + 2r_{\text{к}},$$

которое меньше  $r_x$  на величину сопротивления соединительных проводов.

Присоединив вольтметр к точкам 3, 3' (рис. 6-2), т. е. к потенциальным зажимам, расположенным между токовыми зажимами, найдем третье значение искомого сопротивления:

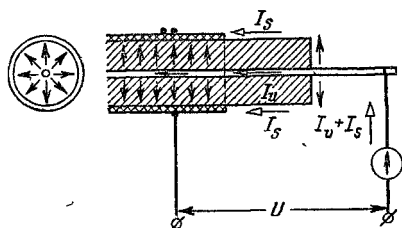


Рис. 6-3. Поверхностный и объемный ток в кабеле.

значение напряжения на искомом сопротивлении между его потенциальными зажимами.

Применение двух пар зажимов, токовых и потенциальных при измерении малых сопротивлений, является основным приемом для устранения влияния соединительных проводов и переходных сопротивлений на результат измерения.

При измерении сопротивлений проводников с малой электрической проводимостью, изолирующих материалов и изделий из них необходимо считаться с факторами, влияющими на значения их сопротивления. Так, при изменении температуры электрокартона от 20 до 40 °С электрическая проводимость его изменяется в 13 раз. При изменении влажности воздуха от 10 до 60% поверхностное электрическое сопротивление фарфора изменяется в 30 раз. Кроме температуры и влажности, на значение сопротивления влияют род тока и испытываемое напряжение, продолжительность действия его и т. п.

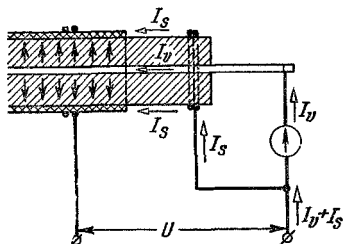


Рис. 6-4. Схема для измерения объемного тока кабеля.

При измерении больших сопротивлений необходимо учитывать наличие объемного и поверхностного электрических сопротивлений. Например, при измерении сопротивления изоляции кабеля гальванометром (рис. 6-3) он может показать: а) объемный ток  $I_v$ , идущий от жилы



к оболочке кабеля через объем изоляции его; б) поверхностный ток  $I_s$ , идущий от жилы к его оболочке по поверхности изолирующего слоя.

Для устранения влияния поверхностной проводимости при измерении объемного электрического сопротивления на изолирующий слой накладывают экран — охранный виток проволоки, который соединяют, как указано на рис. 6-4.

При этом ток  $I_s$  пойдет помимо гальванометра.

На рис. 6-5 дана схема для определения объемного удельного электрического сопротивления материала — пластины  $A$ . Под действием напряжения  $U$ , приложено-

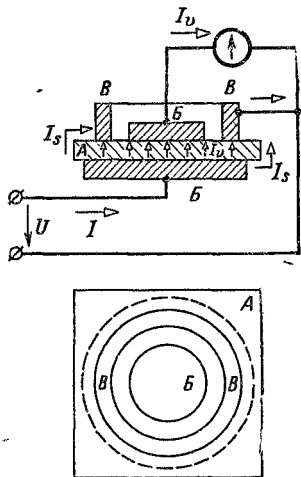


Рис. 6-5. Измерение объемного сопротивления твердого диэлектрика.

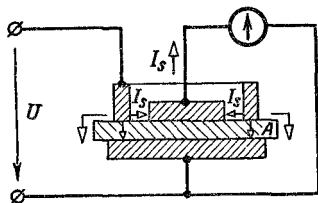


Рис. 6-6. Измерение поверхностного сопротивления твердого диэлектрика.

го к электродам  $B-B$ , через гальванометр проходит ток, обусловленный объемным сопротивлением пластины  $A$ . Кольцо  $B$  является экраном.

Схема для определения поверхностного удельного электрического сопротивления материала  $A$  дана на рис. 6-6.

При измерении больших сопротивлений необходимо проверять сопротивление изоляции самой измерительной установки, так как иначе через гальванометр может проходить ток, обусловленный сопротивлением этой изоляции.

### 6-3. ОММЕТРЫ

Приборы для непосредственного измерения сопротивления (омметры) делят на две группы: с однорабочным и с двухрабочным измерительным механизмом. У однорабочных приборов показания зависят от напряжения ис-

точника питания, а у двухрамочных, называемых также омметры-логометры, не зависят от питающего напряжения, что является существенным достоинством последних.

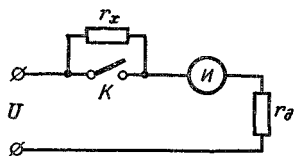


Рис. 6-7. Омметр с последовательной схемой.

а) Омметры с однорамочным измерительным механизмом

Омметр с последовательной схемой (рис. 6-7) имеет однорамочный измерительный механизм *И* магнитоэлектрической системы и добавочный резистор  $r_d$ , последовательно с которыми включается измеряемое сопротивление  $r_x$ . Омметр питается или от внутренней батареи сухих элементов, или от внешней батареи.

При разомкнутой кнопке *K* ток в цепи

$$I = C_I \alpha = U / (r_x + r_{и} + r_d),$$

а угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \frac{1}{r_x + r_{и} + r_d}. \quad (6-1)$$

При постоянном отношении  $U/C_I$  угол поворота подвижной части зависит только от сопротивления  $r_x$ , значения которого наносятся на шкале.

Напряжение батареи элементов не остается неизменным, поэтому омметры имеют приспособление для поддержания отношения  $U/C_I$  постоянным. Таким приспособлением является шунт с переменным сопротивлением или магнитный шунт (§ 2-4), позволяющий изменять магнитную индукцию в воздушном зазоре измерительного механизма, а следовательно, и постоянную по току  $C_I = D/(BSw)$ . Регулировка производится так: при соединенной батарее замыкают кнопку *K*, накоротко замыкая  $r_x$  (рис. 6-7), и поворотом регулировочного винта изменяют положение магнитного шунта, устанавливая стрелку омметра на нулевое деление шкалы прибора. Размыкая кнопку *K*, производят измерение сопротивления  $r_x$ .

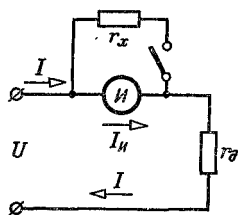


Рис. 6-8. Омметр с параллельной схемой.

В омметре с параллельной схемой (рис. 6-8) измеряемое сопротивление  $r_x$  включается параллельно измерительному механизму.

Ток в измерительном механизме

$$I_{и} = C_I \alpha = I r_x / (r_x + r_{и}).$$

Приняв во внимание, что общий ток цепи

$$I = \frac{U}{r_{д} + \frac{r_x r_{и}}{r_x + r_{и}}},$$

получим:

$$I_{и} = \frac{U}{r_{д} + \frac{r_x r_{и}}{r_x + r_{и}}} \frac{r_x}{r_x + r_{и}} = \frac{U r_x}{r_x r_{д} + r_{д} r_{и} + r_x r_{и}} = \frac{U}{r_{д} + r_{и} + \frac{r_{д} r_{и}}{r_x}}.$$

Следовательно, угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{I_{и}}{C_I} = \frac{U}{C_I} \frac{1}{r_{д} + r_{и} + \frac{r_{д} r_{и}}{r_x}}. \quad (6-2)$$

При неизменном отношении  $U/C_I$  угол поворота подвижной части зависит только от измеряемого сопротивления  $r_x$ . На шкале прибора наносятся деления, соответствующие значениям сопротивления.

Регулировка отношения  $U/C_I$  производится при отсоединенном сопротивлении  $r_x$  изменением регулируемого добавочного резистора или установкой магнитного шунта в положение, при котором стрелка омметра совпадает с делением шкалы  $\infty$ .

Последовательная схема применяется для измерения относительно больших, а параллельная схема — для измерения меньших сопротивлений, так как относительно малые сопротивления при последовательной схеме и большие при параллельной схеме мало влияют на ток в измерительном механизме.

Последовательная схема применяется для измерения относительно больших, а параллельная схема — для измерения меньших сопротивлений, так как относительно малые сопротивления при последовательной схеме и большие при параллельной схеме мало влияют на ток в измерительном механизме.

На рис. 6-9 дана схема одного из омметров типа М-371 класса точности 1,5 с двумя пределами измерения (10

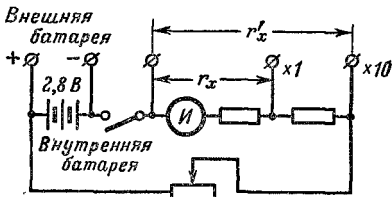


Рис. 6-9. Схема омметра М-371.

и 100 Ом) с параллельной схемой и добавочным регулируемым резистором. Омметры того же типа с последовательной схемой изготавливаются с пределами измерения 100—1 000—10 000 Ом или 100 кОм — 10 МОм.

б) Омметры с двухрамочным измерительным механизмом

Две рамки измерительного механизма логометра магнитоэлектрической системы (рис. 2-7) включены в две параллельные ветви (рис. 6-10). Так как токи в ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, то угол поворота подвижной части логометра

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{r_2 + r_{д2}}{r_1 + r_{д1} + r_x}\right). \quad (6-3)$$

При постоянстве сопротивлений рамок и их добавочных сопротивлений  $r_1 + r_{д1}$  и  $r_2 + r_{д2}$  угол поворота подвижной части омметра зависит только от измеряемого сопротивления  $r_x$ .

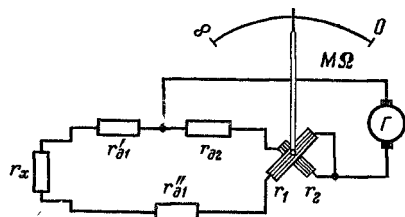


Рис. 6-10. Последовательная схема омметра-логометра.

Питание логометра производится от батареи элементов, или от сети переменного тока через трансформатор и выпрямитель, или от встроенного магнитоэлектрического ручного генератора постоянного тока.

В последнем варианте питания возможно непостоянство напряжения, вызванное неравномерностью вращения ротора генератора, но оно не влияет на отношение токов и на показание омметра.

Омметры-логометры имеют или последовательную схему включения измеряемого сопротивления  $r_x$  (рис. 6-10), применяемую, как известно, при больших  $r$ , или параллельную схему (рис. 6-11), применяемую при малых значениях  $r$ .

Некоторые мегомметры, кроме двух зажимов для присоединения сопротивления  $r_x$ , имеют третий зажим Э для присоединения экрана — для отвода поверхностного тока  $I_S$  помимо измерительной рамки (рис. 6-12).

В качестве примера на рис. 6-12 дана схема мегомметра типа М-1101 с номинальным напряжением 100, 500 или 1 000 В. При  $U = 1\ 000$  В пределы измерения его составляют 0—1 000 кОм и 0,2—200 МОм. Основная погрешность не превышает  $\pm 1\%$ .

Кроме того, отечественная промышленность выпускает большое число омметров, в том числе: 1) омметр типа М218 с магнитоэлектрическим двухрамочным измерительным механизмом; пределы измерения 1—10—100 Ом; 1—10—100 кОм; 1—10 МОм; класс точности 1,5—2,5; питание от сети переменного тока 110, 127, 220 В или от аккумуляторов 6 В; 2) микроомметр

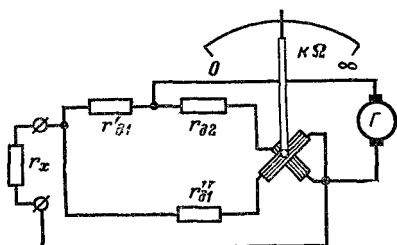


Рис. 6-11. Параллельная схема омметра-логометра.

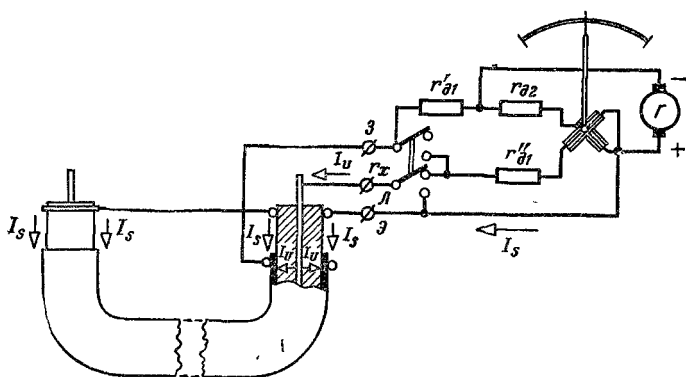


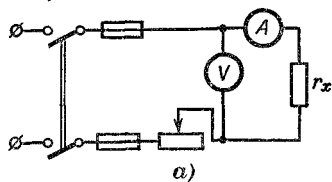
Рис. 6-12. Схема соединения мегомметра М-1101 для измерения сопротивления изоляции кабеля.

типа М246 с магнитоэлектрическим двухрамочным измерительным механизмом; пределы измерения 100—1 000 мкОм; 10—100—1 000 МОм; погрешность  $\pm (2,5-3,5)\%$ ; питание от сети переменного тока 110, 127, 220 В или от аккумулятора 2,5 В.

#### 6-4. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

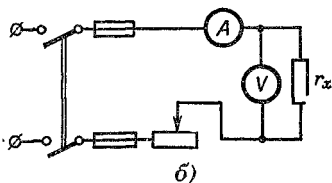
Измерив ток  $I$  в проводнике и напряжение  $U$  на его зажимах, определим сопротивление проводника  $r_x = U/I$ . Отсюда название метода «амперметра—вольтметра», относящегося к косвенным измерениям.

Применяют две схемы включения амперметра и вольтметра. В одной из них (рис. 6-13, а) показания вольтметра



$U_V$  равны сумме напряжений на сопротивлении  $r_x$  и на амперметре  $U_A$ . В этом случае измеряемое сопротивление

$$\begin{aligned} r_x &= (U_V - U_A)/I_A = \\ &= (U_V - I_A r_A)/I_A = \\ &= U_V/I_A - r_A, \end{aligned} \quad (6-4)$$



т. е. появляется погрешность измерения, равная  $r_A$ . Поэтому схему рис. 6-13, а применяют для измерений сопротивлений, больших по сравнению с сопротивлением амперметра (в 100 раз и больше), что позволяет пренебречь значением  $r_A$ , т. е. считать  $r_x = U_V/I_A$ .

Рис. 6-13. Схема соединения для измерения средних сопротивлений амперметром и вольтметром.

а — измеряемое сопротивление велико по сравнению с сопротивлением амперметра; б — измеряемое сопротивление мало по сравнению с сопротивлением вольтметра.

При использовании второй схемы (рис. 6-13, б) показание амперметра  $I_A$  равно

сумме токов в сопротивлении  $r_x$  и вольтметре  $I_V$ , следовательно, измеряемое сопротивление

$$r_x = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{r_V}}. \quad (6-5)$$

Эту схему применяют для измерений сопротивлений, меньших по сравнению с сопротивлением вольтметра (в 100 раз и больше). В этом случае током в вольтметре можно пренебречь, т. е. считать  $r_x = U_V/I_A$ .

При точных измерениях пользуются формулой (6-4) или (6-5) в зависимости от применяемой схемы. В рассмот-

ренных схемах реостат дает возможность установить в цепи ток, обеспечивающий необходимый температурный режим для измеряемого сопротивления.

### 6-5. ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНОМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Установив шунтом  $\text{Ш}$  (рис. 6-14) наименьшую чувствительность, замыкают ключи  $K_1$  и  $K_2$ . Увеличивая чувствительность до нужного значения, производят отсчет по гальванометру и вольтметру  $\alpha'$  и  $U'$ . Пренебрегая сопротивлением шунтированного гальванометра, получают ток цепи

$$I' = C_I p' \alpha' = U' / r_0, \quad (6-6)$$

откуда постоянная гальванометра по току

$$C_I = U' / (r_0 p' \alpha'). \quad (6-7)$$

Определив постоянную, размыкают ключ  $K_2$  и, изменяя чувствительность, получают новое отклонение гальванометра. Произведя отсчет по гальванометру  $\alpha''$ , вольтметру  $U''$  и определив шунтирующий множитель  $p''$ , можно найти сопротивление

$$r_x + r_0 = \frac{U''}{I''} = \frac{U''}{C_I p'' \alpha''}$$

или

$$r_x = \frac{U''}{C_I p'' \alpha''} - r_0. \quad (6-8)$$

Рис. 6-15. Схема для измерения объемного удельного сопротивления.

На рис. 6-15 дана схема для определения объемного удельного электрического сопротивления изолирующего материала (рис. 6-5).

Провод, соединяющий верхний электрод с гальванометром и землей, заключается в заземленную трубу и хорошо

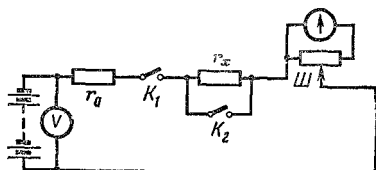
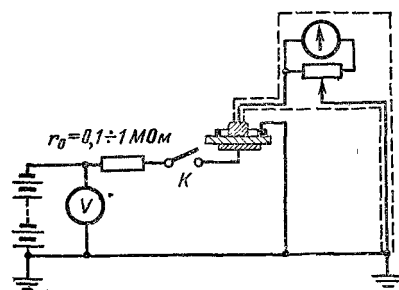


Рис. 6-14. Схема для измерения больших сопротивлений гальванометром и вольтметром.



от нее изолируется. Шунт и гальванометр устанавливаются на заземленном металлическом листе, чем устраняется влияние паразитных токов.

## 6-6. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА

При положениях переключателя *1* и *2* (рис. 6-16) измеряют напряжение сети *U* и напряжение *U<sub>V</sub>*, которое будет на зажимах вольтметра при последовательном соединении его с сопротивлением *r<sub>x</sub>*.

Напряжение на последовательно соединенных участках цепи распределяется пропорционально их сопротивлениям, поэтому

$$r_x/r_V = U_x/U_V = (U - U_V)/U_V,$$

откуда измеряемое сопротивление

$$r_x = r_V (U - U_V)/U_V = r_V (U/U_V - 1). \quad (6-9)$$

Рис. 6-16. Схема для измерения сопротивления вольтметром.

В рассматриваемом случае применяют обычно вольтметр магнитоэлектрической системы. Измеряемое сопротивление должно быть соизмеримо с сопротивлением вольтметра. Если  $r_x \ll r_V$ , то влияние измеряемого сопротивления на показание вольтметра незначительно. Если  $r_x \gg r_V$ , то показание вольтметра мало и точность измерения низкая.

## Б. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ

### 6-7. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Схема соединения для измерения малых сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением дана на рис. 6-17. После замыкания рубильника устанавливают реостатом ток, не превышающий допустимый для резис-



торов  $r_0$  и  $r_x$ . Затем потенциометром или вольтметром измеряют напряжение  $U_0$  и  $U_x$  между потенциальными зажимами образцового резистора  $r_0$  и резистора  $r_x$ .

Для последовательно соединенных резисторов  $r_x$  и  $r_0$  имеем:

$$U_x/r_x = U_0/r_0$$

или

$$r_x = r_0 U_x / U_0. \quad (6-10)$$

Сопротивления  $r_0$  и  $r_x$  должны быть одного порядка. Сопротивление вольтметра должно быть настолько большим, чтобы при включении его параллельно резисторам  $r_0$  и  $r_x$  эквивалентное сопротивление разветвления с достаточной точностью было равно соответствующему сопротивлению. При измерении средних сопротивлений потенциальные зажимы не применяются.

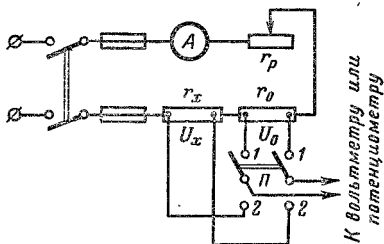


Рис. 6-17. Схема для измерения малых сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением.

### 6-8. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Поставив переключатель  $\Pi$  (рис. 6-18) сначала в положение 1, а затем в положение 2, измеряют токи  $I_0$  и  $I_x$ , для которых можно написать:

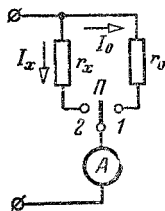


Рис. 6-18. Схема для измерения средних сопротивлений методом замещения.

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{U/r_x}{U/r_0} = \frac{r_0}{r_x},$$

откуда измеряемое сопротивление

$$r_x = r_0 I_0 / I_x. \quad (6-11)$$

При  $I_0 = I_x$  получим  $r_x = r_0$ .

Если этот метод применяется для измерения больших сопротивлений, то амперметр заменяется гальванометром с многопредельным шунтом (рис. 6-19).

Иногда пользуются несколько измененным методом (метод сравнения с образцовым сопротивлением). Установив шунтом наименьшую чувствительность, ставят переключатель в положение 1 и замыкают рубильник  $K$ . Далее шунтом повышают

чувствительность до нужного значения и замечают угол поворота подвижной части гальванометра  $\alpha'$  и шунтирующий множитель  $p'$ . При этом ток в цепи

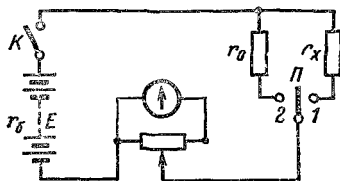


Рис. 6-19. Схема для измерения больших сопротивлений методом замещения.

$$I' = C_I p' \alpha' = E / (r_x + r_g + r_0) \approx E / r_x.$$

Понизив чувствительность гальванометра, ставят переключатель в положение 2 и, повысив чувствительность, вторично замечают  $\alpha''$  и  $p''$ .

В этом случае ток в цепи

$$I'' = C_I p'' \alpha'' = E / (r_0 + r_g + r_0) \approx E / r_0.$$

Поделив почленно последнее выражение на предыдущее, получим:

$$C_I p'' \alpha'' / C_I p' \alpha' = r_x / r_0,$$

откуда определим измеряемое сопротивление

$$r_x = r_0 p'' \alpha'' / p' \alpha'. \quad (6-12)$$

### 6-9. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДИНАРНЫМ МОСТОМ

Магазины резисторов  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r$  (рис. 6-20) и измеряемый резистор  $r_x$  образуют плечи моста — четырехугольный электрический контур  $AB\Gamma$ , в одной диагонали которого включен источник питания, в другой — нулевой указатель (гальванометр).

При данном измеряемом сопротивлении  $r_x$  можно подобрать сопротивления остальных плеч так, что при замкнутых кнопках  $K_1$  и  $K_2$  тока в гальванометре не будет ( $I_r = 0$ ). В этом случае точки цепи  $B$  и  $\Gamma$  имеют потенциалы  $\varphi_B = \varphi_\Gamma$  и, следовательно,

$$I_1 r_1 = I_3 r_x; \quad (6-13)$$

$$I_2 r_2 = I_4 r. \quad (6-14)$$

Кроме того, так как  $I_r = 0$ , то  $I_1 = I_2$  и  $I_3 = I_4$ . Используем указанные соотношения для токов и разделим (6-13) на (6-14):

$$r_1 / r_2 = r_x / r \quad \text{или} \quad r_1 r = r_2 r_x,$$

откуда измеряемое сопротивление

$$r_x = rr_1/r_2. \quad (6-15)$$

Выражение (6-15) остается справедливым, если источник питания и гальванометр поменять местами.

Процесс измерения начинается с присоединения  $r_x$  и источника питания. Затем в плечах отношения  $r_1$  и  $r_2$  включают сопротивления, близкие к предполагаемому значению  $r_x$  или указанные в инструкции для данного моста. Далее изменяют плечо сравнения  $r$  так, чтобы при замкнутых кнопках  $K_1$  и  $K_2$  стрелка гальванометра установилась на нуль шкалы  $I_r = 0$ . Найдя сопротивление плеч уравновешенного моста и подставляя их в (6-15), определяем измеряемое сопротивление.

Если в уравновешенном мосте изменить сопротивление одного из плеч (например,  $r$  или  $r_x$ ) на  $\Delta r$ , то это вызовет в гальванометре появление тока  $\Delta I_r$  и угла поворота его подвижной части  $\Delta\alpha$ . Отношение наименьшего заметного для глаза отклонения указателя гальванометра  $\Delta\alpha$  к изменению сопротивления плеча  $\Delta r$  носит название абсолютной чувствительности моста по току:

$$S_{MI} = \Delta\alpha/\Delta r. \quad (6-16)$$

Чувствительность моста можно выразить как произведение чувствительности гальванометра к току  $\Delta\alpha/\Delta I_r$  и чувствительности мостовой схемы  $\Delta I_r/\Delta r$ , так как

$$S_{MI} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta r} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta I_r} \frac{\Delta I_r}{\Delta r}.$$

Кроме абсолютной чувствительности моста по току, пользуются понятием и относительной чувствительности моста, понимая под ней отклонение указателя гальванометра ( $\Delta\alpha$ ), приходящееся на процент изменения сопротивления плеча. Таким образом, относительная чувствительность

$$S_{MI} = \frac{\Delta\alpha}{\frac{\Delta r}{r} \cdot 100}. \quad (6-16a)$$

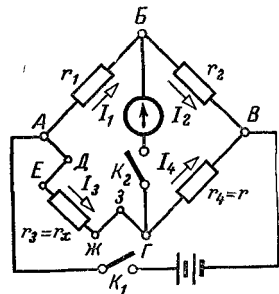


Рис. 6-20. Схема одностороннего моста.

Чувствительность моста увеличивается с увеличением чувствительности гальванометра и с увеличением напряжения источника питания моста. Наибольшее допустимое значение напряжения, определяемое допустимым нагреванием сопротивлений, указывается заводом для каждого моста.

Кроме понятия чувствительности моста по току, применяются понятия чувствительности моста по напряжению и по мощности.

Одинарный мост предназначен в основном для измерений средних сопротивлений. При измерении малых сопротивлений для уменьшения влияния сопротивлений

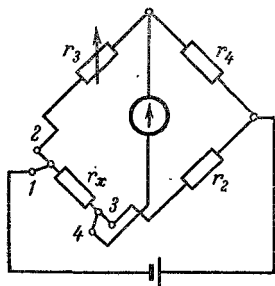


Рис. 6-21. Четырехзажимное соединение измеряемого сопротивления.

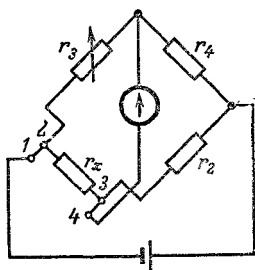


Рис. 6-22. Двухзажимное соединение измеряемого сопротивления.

соединительных проводов на результат измерений применяют четырехзажимное включение измеряемого сопротивления.

На рис. 6-21 и 6-22 в качестве примера приведена четырехзажимная схема для измерения малых сопротивлений и двухзажимная схема для измерения средних сопротивлений, применяемая в мосте типа РЗЗЗ, выпускаемом отечественной промышленностью взамен устаревшего моста типа УМВ.

При измерении малых сопротивлений соединительные провода  $r_x - 1$  и  $r_x - 4$  включаются соответственно в диагональ источника питания, и в диагональ гальванометра, и, следовательно, их сопротивления не влияют на результат измерения. Соединительные провода  $r_x - 2$  и  $r_x - 3$  включаются соответственно в плечи моста  $r_3$  и  $r_2$ , сопротивления которых значительно больше сопротивления соединительных проводов, и, следовательно, влияние

последних на результат измерения будет незначительным.

Мост типа Р333 (рис. 6-23) предназначен для измерений сопротивлений от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $999,9 \cdot 10^3$  Ом. Погрешность

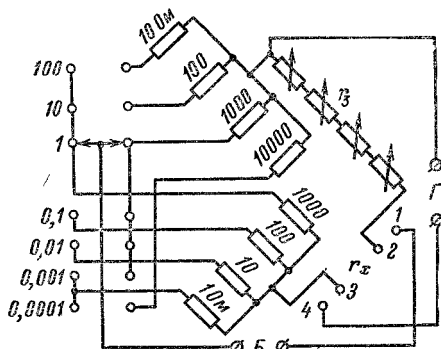


Рис. 6-23. Схема моста типа Р333.

измерения не превышает  $\pm(0,5-1,5)\%$ . Кроме того, мост может быть использован для определения места повреждения изоляции линии.

Плечи отношения состоят из восьми резисторов, сопротивления которых от 1 до 10 000 Ом. При помощи рычажного переключателя можно получить отношение плеч 100; 10; 1; 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001.

Сравнительное плечо — магазин резисторов с четырьмя пятикатушечными декадами — дает возможность получать сопротивление от 1 до 9 999 Ом ступенями по 1 Ом.

Наша промышленность, кроме рассмотренного одинарного магазинного моста типа Р333, выпускает большое число мостов, в том числе мост типа Р316, работающий по двух- и четырехжжимной схеме и обеспечивающий измерение сопротивлений 0,01—100 000 Ом с погрешностью до  $\pm 0,2\%$ .

Кроме магазинных мостов, применяются реохордные мосты (рис. 6-24), плечи отношения которых представляют калиброванную манганиновую проволоку — реохорд, раз-

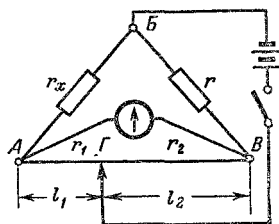


Рис. 6-24. Схема линейного (реохордного) моста.

деленный подвижным контактом на две части — два плеча моста. Сопротивление проволоки неизменного сечения и однородного материала пропорционально длине, поэтому отношение сопротивлений участков ее равно отношению их длин:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\rho l_1}{S} = \frac{l_1}{l_2}.$$

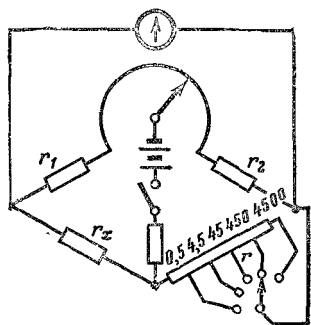


Рис. 6-25. Схема моста типа ММВ.

Это отношение дано на шкале моста и определяется по положению движка. Такие мосты имеют меньшую точность (погрешность примерно  $\pm 2\%$ ) вследствие неравномерного износа реохорда.

При измерении сначала устанавливают плечо сравнения, а затем перемещением движка изменяют отношение плеч, устанавливая стрелку гальванометра на нуль шкалы. Схема одного из выпускаемых нашей промышленностью реохордных мостов типа ММВ дана на рис. 6-25.

Ток в диагонали гальванометра одинарного моста (рис. 6-20) зависит только от значения измеряемого сопротивления, если все остальные сопротивления моста и напряжение на его зажимах остаются постоянными. Следовательно, на шкале гальванометра можно нанести деления, дающие значение измеряемого сопротивления  $r_x$  или величины, однозначно зависящей от  $r_x$ .

Мост называется неуравновешенным, если измеряемая величина определяется по указателю прибора, включенного в диагональ моста. Неуравновешенные мосты широко применяются для измерения температур и других неэлектрических величин.

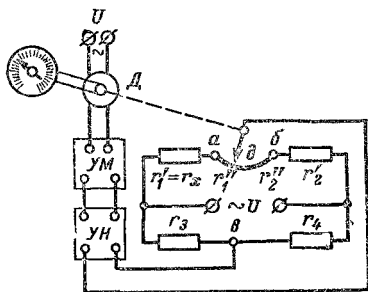


Рис. 6-26. Схема моста с автоматическим уравновешиванием.

В мостах используется ручное и автоматическое уравновешивание (настройка). Схема автоматического моста дана на рис. 6-26. В этой схеме плечо  $r_1$  образовано измеряемым сопротивлением  $r_x = r'_1$  и частью реохорда  $ад — r''_1$ , т. е.  $r_1 = r'_1 + r''_1 = r_x + r''_1$ . Плечо  $r_2$  образовано сопротивлением  $r'_2$  и второй частью реохорда  $дб — r''_2$ . Плечи моста  $r_3$  и  $r_4$  постоянны. В одну диагональ подведено переменное напряжение  $U$ , в другую через усилители напряжения  $УН$  и мощности  $УМ$  включена управляющая обмотка реверсивного асинхронного двигателя  $Д$ , перемещающего движок реохорда  $д$ . Другая обмотка двигателя питается от сети переменного тока.

При равновесии моста напряжение  $U_{вд}$  равно нулю и двигатель неподвижен. При  $r_1 < r_2 r_3 / r_4$  напряжение  $U_{вд}$  имеет одну фазу, а при  $r_1 > r_2 r_3 / r_4$  — противоположную фазу. Фаза этого напряжения, которое после его усиления подается на управляющую обмотку двигателя, определяет направление вращения двигателя. Вращение двигателя прекращается, когда движок  $д$  будет установлен двигателем в положении, при котором мост будет уравновешен. Тот же двигатель производит установку указательной стрелки прибора, проградуированного в значениях измеряемой величины. Погрешность автоматических мостов  $\pm 1\%$ .

### 6-10. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВОЙНЫМ МОСТОМ

Принципиальная схема двойного моста дана на рис. 6-27. Основной ток моста проходит через измеряемое сопротивление  $r_x$ , образцовое сопротивление  $r$  (сравнительное плечо), амперметр, аккумулятор, реостат и рубильник.

К потенциальным зажимам  $б$  и  $жс$  присоединены плечи отношения — два магазина резисторов  $r_1$  и  $r_2$ , а к двум другим зажимам  $в$  и  $е$  — такие же магазины резисторов  $r'_1$  и  $r'_2$ , каждый из которых имеет наименьшее сопротивление 10 Ом.

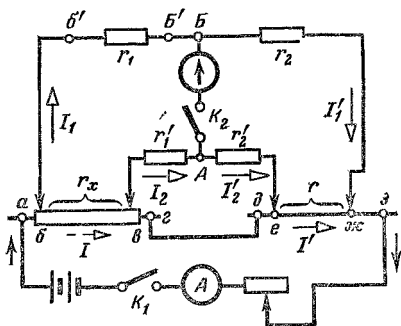


Рис. 6-27. Схема двойного моста.

При измерениях устанавливают сопротивление  $r$ , близкое к предполагаемому значению искомого сопротивления  $r_x$ . Затем, включив какое-либо сопротивление в плечах отношения  $r_2 = r'_2 \geq 10$  Ом, изменяют сопротивление плеч  $r_1 = r'_1 \geq 10$  Ом, устанавливая стрелку гальванометра в нулевое положение. Если при этом невозможно уравновесить мост, то изменяют сопротивление  $r$  плеча сравнения.

Для уравновешенного моста

$$I_r = 0; \quad I_1 = I_1'; \quad I_2 = I_2'; \quad I = I' \quad \text{и} \quad \varphi_A = \varphi_B.$$

Применив второй закон Кирхгофа к замкнутым контурам  $bb'B'BA$  и  $eaBje$ , напишем:

$$I_1 r_1 = I r_x + I_2 r'_1 \quad \text{или} \quad I r_x = I_1 r_1 - I_2 r'_1 = (I_1 - I_2) r_1;$$

$$I_1 r_2 = I' r + I_2 r'_2 \quad \text{или} \quad I' r = I_1 r_2 - I_2 r'_2 = (I_1 - I_2) r_2.$$

Поделив почленно написанные уравнения, получим:

$$r_x / r = r_1 / r_2,$$

откуда измеряемое сопротивление

$$r_x = r r_1 / r_2. \quad (6-17)$$

Малое измеряемое сопротивление  $r_x$  ограничено потенциальными зажимами  $bb$ , другое малое сопротивление  $r$  также ограничено зажимами  $ej$ . Токовые зажимы  $a$  и  $g$ ,  $d$  и  $z$  лежат за границами соответствующих сопротивлений  $r_x$  и  $r$ , и поэтому переходные сопротивления в точках  $a$ ,  $g$ ,  $d$ ,  $z$  не могут влиять на результат измерения.

Переходное сопротивление в точке  $b$  и соединительный провод  $bb'$  включены последовательно с сопротивлением  $r_1 \geq 10$  Ом, т. е. несоизмеримо большим, и, следовательно, погрешность, вносимая ими, будет ничтожно мала. То же можно сказать и об остальных плечах  $r_2$ ,  $r'_1$  и  $r'_2$ . Таким образом, в рассмотренном мосте устранено влияние на результат измерений переходных сопротивлений и сопротивлений соединительных проводов.

Мост типа Р329, выпускаемый краснодарским заводом ЗИП взамен моста устаревшего типа МТВ, предназначен для работы по схеме одинарного и двойного моста (рис. 6-28). Плечи моста  $r_1$  и  $r'_1$  имеют по пять рычажных декад, катушки которых соответственно имеют значения 0,01; 0,1; 1; 10 и 100 Ом. Рукоятки магазинов связаны механически, обеспечивая выполнение равенства  $r_1$  и  $r'_1$ . Плечи  $r_2$  и  $r_3$  (соответствуют  $r_2$  и  $r'_2$  на рис. 6-27) выполнены в виде



штепсельных магазинов с одинаковыми значениями 10; 100; 1 000 и 10 000 Ом.

Блок встроенных образцовых резисторов  $r_N$  (соответствует  $r$  на рис. 6-27) выполнен в виде двух катушек сопротивлением 0,001 и 1 Ом.

Измерение сопротивлений от  $10^{-6}$  до 100 Ом производится по схеме, данной на рис. 6-28. При образцовой катушке  $r_N = 0,001$  Ом ток, идущий через нее от источ-

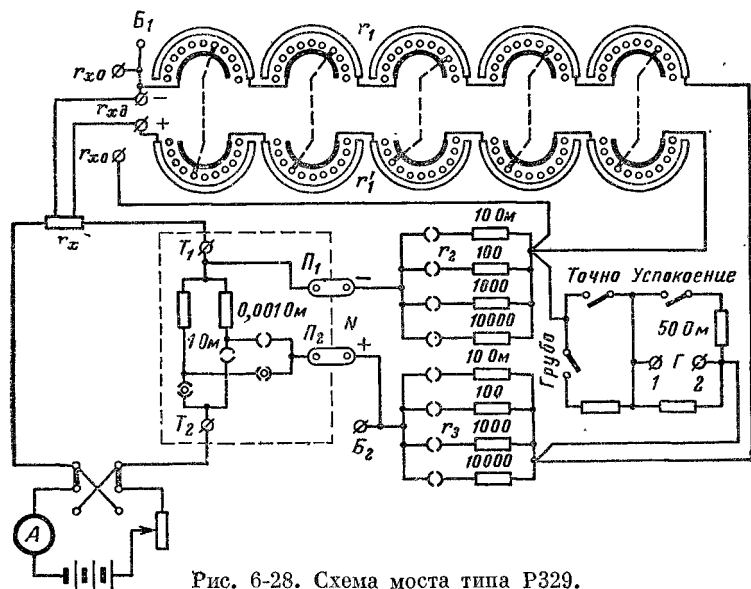


Рис. 6-28. Схема моста типа P329.

ника питания, должен быть равен 32 А, а при  $r_N = 1$  Ом он будет равен 0,5 А. Гальванометр присоединяется к зажимам Г, 1 и 2. Измеряемое сопротивление определяется после уравнивания моста по формуле (6-17), где следует принять  $r = r_N$ .

При использовании моста в качестве одинарного измеряемое сопротивление присоединяется к зажимам  $r_{x0}$ , тем самым сопротивление  $r'_1$  отсоединяется, а  $r_1$  становится плечом сравнения,  $r_2$  и  $r_3$  — плечами отношения. Зажимы  $N$  замыкаются накоротко. Источник питания ( $U_0 = 2$ В) присоединяется к зажимам  $B_1$  и  $B_2$ . После уравнивания моста определяется измеряемое сопротивление  $r_x = r_1 r_2 / r_3$ .

При измерении сопротивлений в пределах  $10^{-3} - 10^3$  Ом погрешность не превышает  $\pm 0,05\%$ .

## В. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

### 6-11. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИЗМЕРЕНИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВОК

Каждую электрическую сеть можно рассматривать состоящей из ряда последовательно соединенных участков

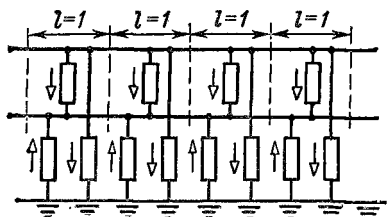


Рис. 6-29. Единичные участки двухпроводной линии и их сопротивления изоляции.

и между проводами и землей включены сосредоточенные сопротивления, эквивалентные сопротивлениям единичных участков (рис. 6-30).

Изоляция различных электрических установок легко подвергается изменению и повреждению; поэтому за состоянием изоляции установки, за сопротивлением изоляции необходимо следить в течение всего времени эксплуатации.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) требуется: 1) испытывать сопротивление изоляции осветительных и силовых электропроводок мегомметром с напряжением 1 000 В; 2) наименьшее сопротивление изоляции должно быть не ниже 0,5 МОм; 3) сопротивление изоляции при снятых плавких вставках измерять на участке между смежными предохранителями или за последним предохранителем между любым проводом и землей, а также между двумя любыми проводами.

единичной длины, а сопротивление изоляции — состоящим из ряда параллельно соединенных между собой сопротивлений изоляции единичных участков (рис. 6-29). Таким образом, электрическую сеть можно заменить эквивалентной схемой, в которой между проводами и между проводами и землей

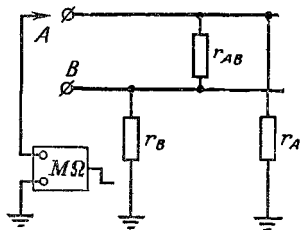


Рис. 6-30. Эквивалентная схема двухпроводной сети и схема измерения сопротивления изоляции одного из проводов относительно земли.

## 6-12. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВКИ, НЕ НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Для измерения сопротивления изоляции установки, не находящейся под рабочим напряжением, приемники энергии отсоединяются (на рис. 6-30 они не показаны). Для измерения сопротивления  $r_A$  (изоляции провода  $A$  относительно земли) один зажим мегомметра присоединяется к испытываемому проводу, а другой его зажим — к земле.

При этом в результате измерения будет найдено эквивалентное сопротивление разветвления двух ветвей: одной

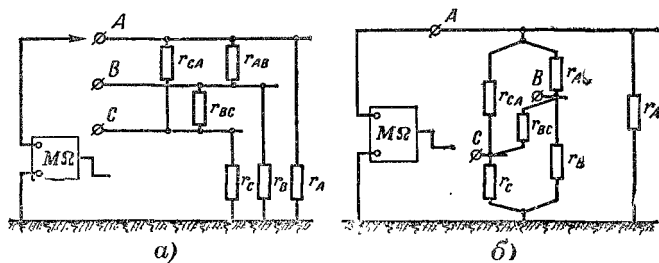


Рис. 6-31. Эквивалентная схема трехпроводной сети и схема измерения сопротивления изоляции провода  $A$  относительно земли (а) и та же схема в другом виде (б).

$r_A$  и второй  $r_B + r_{AB}$ . Это найденное сопротивление  $r_{\partial A}$  будет или меньше сопротивления  $r_A$  или равно ему, если  $r_B + r_{AB} = \infty$ . В общем случае  $r_{\partial A} \leq r_A$ .

Измеряя аналогично сопротивление  $r_B$  между проводом  $B$  и землей и  $r_{AB}$  между проводами  $A$  и  $B$ , определим наименьшие значения сопротивлений  $r_B$  и  $r_{AB}$ .

Для измерения сопротивления изоляции провода  $A$  трехпроводной установки относительно земли один зажим мегомметра присоединяют к проводу  $A$ , а второй — к земле (рис. 6-31). В этом случае будет измерено эквивалентное сопротивление  $r_{\partial A}$  двух параллельных ветвей, одной  $r_A$  и второй, состоящей из пяти сопротивлений. Как было показано,  $r_{\partial A} \leq r_A$ .

Измеряя аналогично сопротивления между проводом  $B$  и землей, между проводом  $C$  и землей и между проводами  $AB$ ,  $BC$  и  $CA$ , можно определить наименьшие значения сопротивлений  $r_B$ ,  $r_C$ ,  $r_{AB}$ ,  $r_{BC}$  и  $r_{CA}$ .

Если приемники энергии присоединены к электрической сети, то три провода установки будут соединены между собой малыми (по сравнению с сопротивлением изоляции) сопротивлениями приемников, и, следовательно, сопротивления изоляции проводов относительно земли  $r_A$ ,  $r_B$  и  $r_C$  (рис. 6-32) соединены между собой параллельно. В этом случае имеет смысл производить измерение сопротивления изоляции между одним из проводов и землей, причем результат измерения следующий:

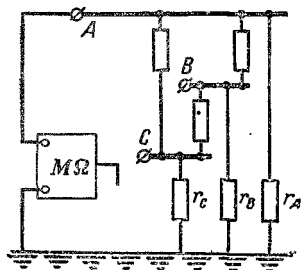


Рис. 6-32. Схема измерения сопротивления изоляции трехпроводной линии относительно земли.

$$r_{из} = r_A r_B r_C / (r_A r_B + r_B r_C + r_C r_A).$$

Если при включенных приемниках энергии значение  $r_{из}$  удовлетворяет требованию ПУЭ, то тем более она удовлетворяет этим требованиям при отсоединенных приемниках энергии.

### 6-13. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВКИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Для измерения сопротивления изоляции установки, находящейся под рабочим напряжением  $U$ , измеряют вольтметром напряжение  $U$ , напряжение  $U_A$  между проводом  $A$  и землей и напряжение  $U_B$  между проводом  $B$  и землей (рис. 6-33).

Включив вольтметр между проводом  $A$  и землей (положение переключателя  $A$ ) и обозначив  $r_V$  — сопротивление вольтметра, можно написать выражение тока, идущего через  $r_B$  — сопротивление изоляции провода  $B$ :

$$I_1 = \frac{U - U_A}{r_B} = \frac{U}{r_B + \frac{r_A r_V}{r_A + r_V}}. \quad (6-18)$$

Включив вольтметр между проводом  $B$  и землей (положение переключателя  $B$ ), можно написать выражения

тока, идущего через  $r_A$  — сопротивление изоляции провода  $A$ :

$$I_2 = \frac{U - U_B}{r_A} = \frac{U}{r_A + \frac{r_B r_V}{r_B + r_V}}. \quad (6-19)$$

Решив совместно (6-18) и (6-19), найдем сопротивление

$$r_A = r_V (U - U_A - U_B) / U_B \quad (6-20)$$

и сопротивление

$$r_B = r_V (U - U_A - U_B) / U_A. \quad (6-21)$$

Если сопротивление  $r_A \gg r_V$ , то при переключателе, установленном в положении  $A$  (рис. 6-33), вольтметр будет соединен последовательно с сопротивлением  $r_B$ , которое можно определить по формуле (6-9):

$$r_B = r_V (U / U_A - 1). \quad (6-22)$$

Аналогично, если  $r_B \gg r_V$ , то при переключателе, установленном в положении  $B$ , вольтметр будет соединен последовательно с сопротивлением  $r_A$ , значение которого

$$r_A = r_V (U / U_B - 1). \quad (6-23)$$

Таким образом, показания вольтметра, включенного между проводом и землей, при постоянном напряжении сети зависят только от сопротивления изоляции второго провода. Поэтому на шкале вольтметра можно нанести деления, дающие значения сопротивления.

Контроль за состоянием изоляции в двухпроводных сетях можно осуществить при помощи вольтметров (рис. 6-34). При нормальном состоянии изоляции каждый из вольтметров покажет напряжение, равное половине напряжения сети.

Уменьшение сопротивления изоляции одного из проводов вызовет уменьшение показаний вольтметра, подключенного к этому проводу, и увеличение показаний

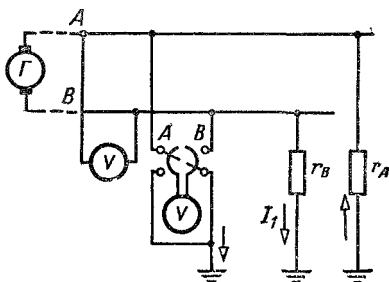


Рис. 6-33. Схема измерения сопротивлений изоляции двухпроводной сети вольтметром.

второго вольтметра вследствие уменьшения эквивалентного сопротивления между зажимами первого вольтметра и распределения напряжения сети пропорционально сопротивлениям.

Для контроля за изоляцией в трехфазных сетях применяются три вольтметра (рис. 6-35). При исправной изоляции всех трех проводов вольтметры показывают одинаковые фазные напряжения. При уменьшении сопротивления изоляции одного из проводов, например первого, показание первого вольтметра уменьшается, так как уменьшится разность потенциалов между первым про-

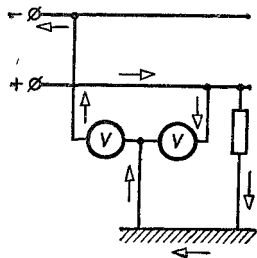


Рис. 6-34. Схема для контроля за состоянием изоляции двухпроводной сети.

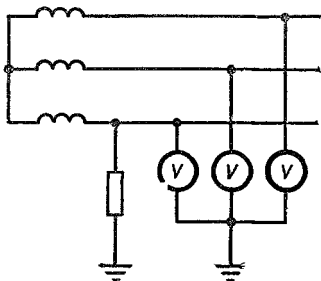


Рис. 6-35. Схема для контроля за состоянием изоляции трехфазной сети.

водом и землей. В то же время показания других вольтметров возрастут. При уменьшении сопротивления изоляции первого провода до нуля показание первого вольтметра будет равно нулю, а второй и третий вольтметры покажут линейные напряжения.

В трехфазных цепях с незаземленной нейтралью при напряжении выше 1 кВ для контроля за изоляцией применяются вольтметры с тремя однофазными трансформаторами напряжения (рис. 6-36) или с одним пятистержневым трансформатором (рис. 6-37). Трехстержневые трансформаторы для этой цели не пригодны, так как при заземлении одной из фаз первичная обмотка этой фазы трансформатора будет замкнута накоротко, а две другие будут находиться под линейными напряжениями, вследствие чего создаются неблагоприятные условия для работы трансформатора.

В пятистержневом трансформаторе при заземлении одной из фаз магнитные потоки двух других фаз трансфор-

матора замкнутся через дополнительные стержни магнитопровода, не вызывая недопустимого нагрева трансформатора. К обмоткам, наложенным на дополнительные

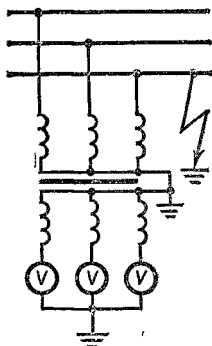


Рис. 6-36. Схема для контроля за состоянием изоляции трехфазной высоковольтной сети.

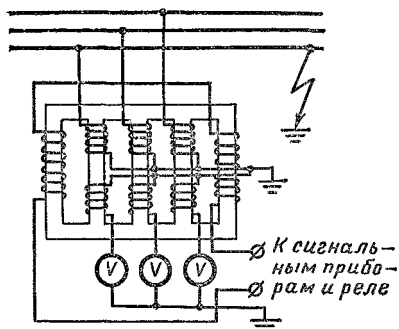


Рис. 6-37. Схема устройства и включения пятysterжневого трансформатора напряжения.

стержни, присоединяются реле и сигнальные приборы, приходящие в действие при заземлении одной из фаз установки.

#### 6-14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИИ

При повреждении изоляции кабельной линии важно определить место повреждения, для того чтобы быстро устранить его.

В кабелях могут быть следующие повреждения: 1) пробой изоляции между жилой и броней; 2) пробой изоляции между жилами; 3) обрыв жилы; 4) сложные комбинированные повреждения.

Одним из методов определения места повреждения изоляции является метод петли. Он применяется в том случае, если произошел пробой между жилой кабеля и броней или между двумя жилами в трехжильном кабеле. Точное определение возможно при малом сопротивлении места пробоя, не выше 1 000 Ом.

Если сопротивление велико, то его необходимо уменьшить прожиганием, что достигается обугливанием изо-

ляции при прохождении постоянного или переменного тока высокого напряжения через поврежденное место изоляции.

Метод петли из жил кабеля — метод Муррея — представляет собой использование схемы одинарного моста.

Для определения места пробоя между жилой и броней или землей концы  $b-b'$  исправной и поврежденной жил кабеля закорачиваются. К двум другим концам  $a-a'$  подключают магазины сопротивлений  $R$  и  $r_A$  и гальванометр (рис. 6-38). Зажим, в котором соединены магазины резисторов, через батарею элементов соединен с землей.

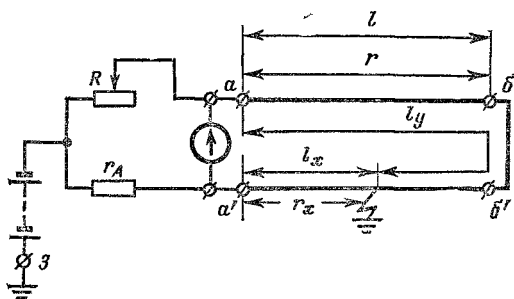


Рис. 6-38. Схема для определения места повреждения изоляции кабеля методом петли.

В результате имеем схему моста (рис. 6-38), равновесие которой определяется условием

$$Rr_x = r_A(2r - r_x),$$

откуда

$$r_x = 2rr_A / (R + r_A). \quad (6-24)$$

Определив  $r_x$ , зная удельное сопротивление  $\rho$  материала жил кабеля и их сечение  $S$ , по формуле  $l_x = r_x S / \rho$  определяют расстояние от конца кабеля  $a'$  до места повреждения изоляции.

При неизменном сечении жил кабеля в (6-24)  $r_x$  и  $r$  можно заменить их выражениями:

$$\rho \frac{l_x}{S} = 2\rho \frac{l}{S} \frac{r_A}{R + r_A},$$

откуда определяется расстояние до места повреждения

$$l_x = 2lr_A / (R + r_A). \quad (6-25)$$



Для проверки результата измерения производят второе аналогичное измерение, поменяв концы кабеля  $a$  и  $a'$ . При этом расстояние до места повреждения определяют по формуле

$$l_y = 2lg'_A / (R' + r'_A),$$

где  $R'$  и  $r'_A$  — значения сопротивлений плеч моста при втором измерении. Правильность результатов измерений подтверждается равенством  $l_x + l_y = 2l$ .

Сопротивление соединительного провода и переходные сопротивления в точках  $b-b'$  должны быть малы.

Для определения места повреждения изоляции кабеля можно применить мост РЗЗЗ или кабельный мост РЗЗ4.

## Г. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

### 6-15. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ЗАЗЕМЛЕНИЮ

Заземлителем называется металлический проводник или группа проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей. Заземляющими проводниками называются металлические проводники, соединяющие заземляемые части электроустановки с заземлителем. Совокупность заземлителя и заземляющих проводников называется заземляющим устройством.

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение какой-либо части электроустановки с заземляющим устройством. Сопротивлением заземления (заземляющего устройства) называется сумма сопротивлений заземлителя относительно земли и заземляющих проводников. Сопротивление заземлителя относительно земли определяется как отношение напряжения на заземлителе относительно земли к току, проходящему через заземлитель в землю. Сопротивление заземления может сильно изменяться от времени года и состояния погоды (дождь или сухая погода). Сопротивление заземления не должно повышаться более некоторого установленного ПУЭ значения, так как иначе обслуживание установки может стать небезопасным или сама установка может оказаться в недопустимых условиях работы, например:

1) согласно ПУЭ сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединяются нейтрали генераторов

и трансформаторов напряжением до 1 кВ мощностью меньше 100 кВ·А, должно быть не более 10 Ом; а при большей мощности — не более 4 Ом;

2) сопротивление заземляющего устройства для заземления электрооборудования напряжением до 1 кВ при мощности генератора или трансформатора менее 100 кВ·А должно быть не более 10 Ом, а при большей мощности — не более 4 Ом.

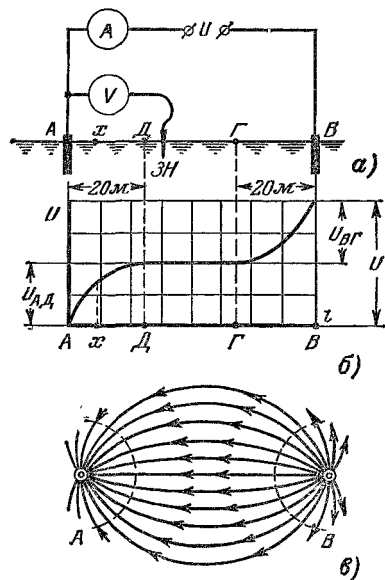


Рис. 6-39. Распределение потенциалов между двумя электродами на поверхности земли.

*a* — схема для нахождения распределения потенциалов; *б* — кривая падения напряжения; *в* — схема прохождения токов.

растет, а далее на среднем участке между трубами остается неизменным.

Такое распределение напряжения объясняется тем, что линии тока у первого заземлителя расходятся, а у второго сходятся, следовательно, плотность тока вблизи заземлителей большая, а на большом расстоянии от них ничтожно малая.

На основании сказанного выше сопротивление первого заземлителя  $r_A = U_{AD}/I$ , а второго  $r_B = U_{BG}/I$ .

Точки поверхности земли в зоне, падение напряжения в которой равно нулю (зона  $ДГ$ , рис. 6-39), называются точками нулевого потенциала.

Потенциал  $\varphi_x$  любой точки  $x$  в зоне заземлителя будет равен напряжению между этой точкой и точкой нулевого потенциала, например точкой  $Д$ :

$$U_{xД} = \varphi_x - \varphi_Д = \varphi_x - 0 = \varphi_x,$$

а потенциалы заземлителей  $A$  и  $B$ , называемые полными потенциалами, будут равны:  $\varphi_A = U_{AД}$  и  $\varphi_B = U_{BГ}$ .

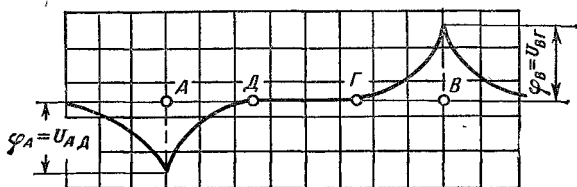


Рис. 6-40. Кривая распределения потенциалов на поверхности земли.

Кривая распределения потенциала на поверхности земли на линии, соединяющей заземлители  $A$  и  $B$ , дана на рис. 6-40, форма ее зависит только от формы заземлителей и их расположения.

Измерение сопротивления заземления можно производить различными методами, например методом амперметра и вольтметра; методом компенсации; при помощи специальных логометров и др. Во всех случаях измерения сопротивления заземления применяют переменный ток.

#### 6-16. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Испытуемый заземлитель  $A$  (рис. 6-41) и вспомогательный заземлитель  $B$  соединены со вторичной обмоткой силового трансформатора. Измерив ток амперметром и напряжение вольтметром, соединенным с заземлителем  $A$  и зондом, расположенным в зоне нулевого потенциала, определим сопротивление заземлителя  $A$ :  $r_x = U/I$ .

Вольтметр должен обладать большим по сравнению с зондом сопротивлением, так как они соединены после-

довательно (рис. 6-42), а напряжение на зонде должно быть ничтожно малым. В противном случае возникнет

значительная погрешность. Она может быть выражена так:

$$\gamma_r = \frac{r_{3H}}{r_V + r_{3H}} \cdot 100\%.$$

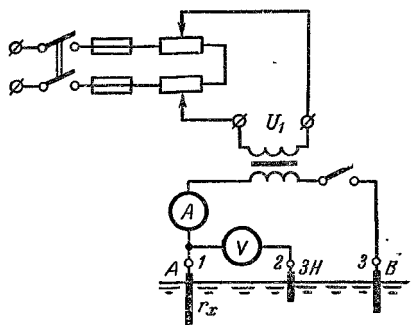


Рис. 6-41. Схема для измерения сопротивления заземления амперметром и вольтметром.

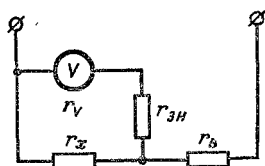


Рис. 6-42. Эквивалентная схема цепи, изображенной на рис. 6-41.

Для измерений следует применять вольтметры электростатической, электронной или детекторной систем.

Этим методом рекомендуют пользоваться при ответственных измерениях и при изменении малых сопротивлений заземлений.

### 6-17. ИЗМЕРИТЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ТИПА М1103

Измеритель типа М1103 (рис. 6-43) имеет источник питания переменного тока, трансформатор тока  $ТТ$ , вторичная обмотка которого замкнута на резистор  $r_{аб}$ , и измерительный механизм  $И$  магнитоэлектрической системы, присоединенный ко вторичной обмотке изолирующего трансформатора  $ИТ$  через механический выпрямитель.

При измерении зажим 1 прибора соединяется с испытуемым заземлителем  $A$ , зажим 2 — с зондом  $3H$ , зажим 3 — с вспомогательным заземлителем  $B$ .

При вращении рукоятки генератора ток  $I_1$  проходит от зажима генератора  $G$  по первичной обмотке трансформатора тока, заземлителю  $A$ , земле и заземлителю  $B$ .

Ток  $I_1$  создает на измеряемом сопротивлении падение напряжения  $U_1 = I_1 r_x$ . Ток вторичной цепи  $I_2$  создает на сопротивлении  $r_{ад}$  падение напряжения  $U_2 = I_2 r_{ад}$ . Перемещая движок  $\partial$ , можно получить компенсацию  $U_1 =$

$= U_2$ , при которой тока в первичной обмотке изолирующего трансформатора не будет, а следовательно, не будет тока и во вторичной цепи изолирующего трансформатора и измерительном механизме  $И$  ( $\alpha_{И} = 0$ ). В этом случае  $I_1 r_x = I_2 r_{ад}$ , но при  $I_1 = I_2$  имеем  $r_x = r_{ад}$ .

Значение сопротивления заземления отсчитывается на шкале прибора по положению движка  $\delta$ . Шунтированием резистора  $r_{аб}$  (рис. 6-43, сопротивление  $r_{ш}$ ) предел измерения изменяется от 10 до 50 Ом.

Исправность прибора проверяется при отключенных заземлителях и переключателе  $П_2$  в положении  $K$ , при котором к зажимам 1 и 2 присоединяется резистор  $r_k = 10$  Ом, а зажимы 2 и 3 замыкаются. При вращении рукоятки прибора компенсация должна быть при положении движка на 10 Ом.

При номинальной частоте вращения рукоятки прибора 120 об/мин частота тока генератора 120 Гц.

Для измерения сопротивления зажимы прибора 2 и 3, соединенные вместе, присоединяются к одному зажиму измеряемого сопротивления, а второй зажим его присоединяется к зажиму 1 прибора. Процесс измерения не отличается от рассмотренного выше.

Изолирующий трансформатор и механический выпрямитель обеспечивают независимость показаний от блуждающих токов. Сопротивления зонда мало влияют на результат измерения.

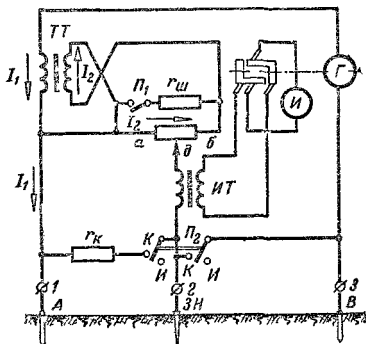


Рис. 6-43. Прибор для измерения сопротивления заземления типа М1103.

#### 6-18. ИЗМЕРИТЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ТИПА МС-08

Принципиальная схема измерителя дана на рис. 6-44. Одна рамка логометра включена в цепь тока  $I_1$  последовательно с испытуемым заземлителем  $A$  и вспомогательным заземлителем  $B$ . Вторая рамка логометра вместе с добавочным резистором  $r_d$  подключена к испытуемому

заземлителю и зонду ЗН. Цепь второй рамки, сопротивление которой  $r_2$ , находится под напряжением, равным падению напряжения на измеряемом сопротивлении  $r_x$ , и, следовательно, ток в этой рамке

$$I_2 = I_1 r_x / (r_2 + r_d + r_{3H}).$$

Угол поворота подвижной части логометра

$$\begin{aligned} \alpha &= F \left( \frac{I_1}{I_2} \right) = \\ &= F \frac{I_1}{\frac{I_1 r_x}{r_2 + r_d + r_{3H}}} = \\ &= F \left( \frac{r_2 + r_d + r_{3H}}{r_x} \right) = F \left( \frac{k}{r_x} \right). \end{aligned}$$

При постоянном значении  $k = r_2 + r_d + r_{3H}$  угол

поворота подвижной части зависит только от  $r_x$ . Сопротивление зонда ( $r_{3H}$ ) может изменяться, поэтому добавочное сопротивление  $r_d$  регулируют перед каждым измерением, изменяя его до тех пор, пока стрелка прибора не установится на контрольной отметке шкалы.

Измерение сопротивлений заземлений производится на переменном токе, а электромагнитный измерительный механизм применим только при постоянном токе. Приборы типа МС-08 имеют электро-механический преобразователь МП постоянного тока в переменный и механический выпрямитель (МВ на рис. 6-45).

В течение первой половины оборота механического преобразователя ток в его цепи проходит в одном направлении (рис. 6-45). Затем преобразователь переключает часть цепи, состоящей из измеряемого заземлителя, земли и вспомогательного заземлителя, и по ней в течение второй половины оборота проходит ток обратного направления.

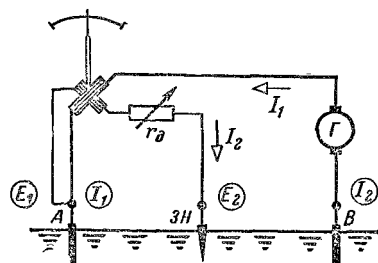


Рис. 6-44. Принципиальная схема прибора для измерения сопротивлений заземлений типа МС-08.

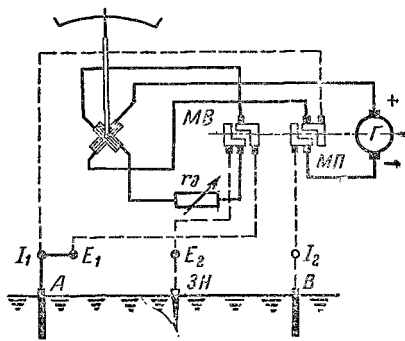


Рис. 6-45. Схема прибора типа МС-08.

Следовательно, в земле проходит переменный ток, и к двум щеткам механического выпрямителя, соединенным с землей, будет приложено переменное напряжение; на двух других щетках этого выпрямителя будет выпрямленное напряжение, под которым и находится цепь второй рамки и добавочного сопротивления. На рис. 6-45 участки цепи, по которым проходит переменный ток, показаны пунктиром.

Механический преобразователь и выпрямитель делают показания прибора практически не зависимыми от блуждающих токов, а регулируемый добавочный резистор исключает влияние сопротивления зонда.

У прибора имеются три предела измерения: 10, 100 и 1 000 Ом.

## *Глава седьмая*

### **ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ, ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ**

#### *А. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ*

#### **7-1. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИЗМЕРЕНИЮ ИНДУКТИВНОСТИ, ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ**

При выборе метода измерения и производстве измерений необходимо иметь в виду, что индуктивность  $L$  и взаимная индуктивность  $M$  могут зависеть от тока, напряжения и от внешних электромагнитных полей, а емкость  $C$  — от частоты переменного тока, напряжения, температуры и т. п.

Если тот или другой фактор влияет на измеряемую величину и им пренебречь нельзя, то при измерении необходимо создать те же условия, в которых измеряемый объект будет находиться при его эксплуатации. Если зависимость между влияющим фактором и измеряемой величиной известна, то измерение можно проводить в любых условиях, но после измерения сделать соответствующий пересчет результата измерения.

## 7-2. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

### а) Метод амперметра и вольтметра

Измерив ток  $I$  в катушке (рис. 7-1) и напряжение  $U$  на ее зажимах, можно определить ее полное сопротивление

$z = U/I = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}$ , а затем и индуктивность

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{z^2 - r^2}. \quad (7-1)$$

Активное сопротивление катушки  $r$  и угловая частота тока  $\omega = 2\pi f$  должны быть известны, а форма кривой напряжения должна быть практически синусоидальной. Если сопротивление катушки относительно велико, то следует пользоваться схемой, аналогичной указанной на рис. 6-13, а.

Точность измерения этим методом низкая из-за суммирования погрешностей показаний приборов.

Точность измерения этим методом низкая из-за суммирования погрешностей показаний приборов.

### б) Метод ваттметра

Используя показания приборов (рис. 7-2), определяем активное сопротивление катушки  $r = P/I^2$ . Затем

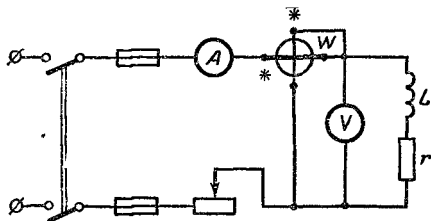


Рис. 7-2. Схема для измерения индуктивности амперметром, вольтметром и ваттметром.

по (7-1) вычисляем искомую индуктивность. Или, заменив в (7-1) величину  $r$ , получим:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{z^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}. \quad (7-2)$$

Точность измерения этим методом также низкая.

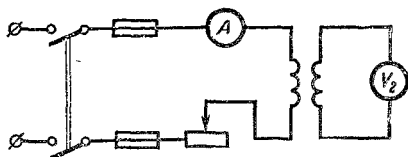


### 7-3. ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

#### а) Метод амперметра и вольтметра

Если измерить ток  $I_1$  в первичной катушке (рис. 7-3) и индуцированную во вторичной катушке э. д. с.  $E_2 = MI_1\omega$ , то взаимную индуктивность можно

Рис. 7-3. Схема для измерения взаимной индуктивности амперметром и вольтметром.



определить по формуле

$$M = E_2 / (\omega I_1). \quad (7-3)$$

Для измерения э. д. с. следует пользоваться вольтметром электростатической, электронной или детекторно-ной систем.

#### б) Метод последовательного соединения катушки

Как известно из электротехники, при согласном последовательном соединении двух катушек (рис. 7-4, а) их

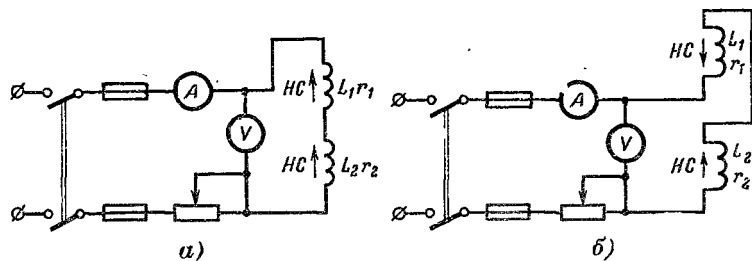


Рис. 7-4. Схема для измерения взаимной индуктивности методом последовательного соединения катушек.

общая индуктивность

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M; \quad (7-4)$$

ее можно определить одним из методов измерения индук-

тивности, например методом амперметра и вольтметра, применяя формулу

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{z_a^2 - (r_1 + r_2)^2},$$

где  $z_a$  — полное сопротивление цепи двух катушек при согласном последовательном соединении их.

При встречном последовательном соединении двух катушек (рис. 7-4, б), как известно, их общая индуктивность

$$L_b = L_1 + L_2 - 2M. \quad (7-5)$$

Индуктивность  $L_b$  можно определить теми же методами, что и индуктивность  $L_a$ , в частности методом амперметра и вольтметра, применяя формулу

$$L_b = \frac{1}{\omega} \sqrt{z_b^2 - (r_1 + r_2)^2},$$

где  $z_b$  — полное сопротивление цепи двух катушек при встречном последовательном соединении их.

Вычитая почленно из (7-4) (7-5), получаем:

$$L_a - L_b = 4M,$$

откуда

$$M = (L_a - L_b)/4. \quad (7-6)$$

#### 7-4. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

##### а) Метод амперметра и вольтметра

Пренебрегая потерями в диэлектрике конденсатора, емкость его можно определить методом амперметра и вольтметра.

Измерив ток и напряжение (рис. 7-5) и зная частоту переменного тока, емкость можно определить по формуле

$$C = I/(\omega U). \quad (7-7)$$

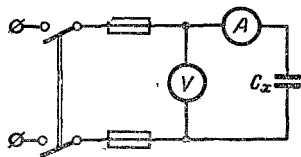


Рис. 7-5. Схема для измерения емкости амперметром и вольтметром.

При измерении емкости этим методом напряжение должно быть синусоидальным, так как в противном случае за счет высших гармоник может произойти значительное искажение кривой тока, что может привести к большим погрешностям измерения.

## б) Метод ваттметра

Определив по показанию приборов (рис. 7-6) ток, напряжение и мощность, можно вычислить сначала активное сопротивление  $r = P/I^2$ , полное сопротивление цепи  $z = U/I =$

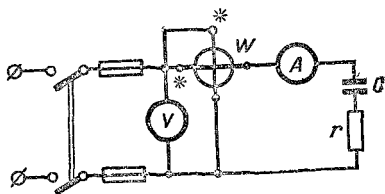


Рис. 7-6. Схема для измерения емкости амперметром, вольтметром и ваттметром.

$= \sqrt{r^2 + [1/(\omega C)]^2}$ , а затем и искомую емкость:

$$C = 1/(\omega \sqrt{z^2 - r^2})$$

или, объединив написанные формулы, получим:

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{z^2 - r^2}} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}} = \frac{I^2}{\omega \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}. \quad (7-8)$$

Мощность потерь в конденсаторе

$$P = UI \cos \varphi = I^2 \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \delta,$$

откуда тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{I^2 \frac{1}{\omega C}} = \frac{P \omega C}{I^2}. \quad (7-9)$$

Точность измерений при этом методе такая же или несколько выше, чем у предыдущего (§ 7-4, а).

Измерение ваттметром мощности потерь в конденсаторах не всегда возможно вследствие ее малости. Поэтому чаще пользуются мостовыми методами измерений емкости.

## 7-5. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Если переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  (рис. 7-7) установить в положение 1, то образцовый конденсатор  $C_0$  получит заряд  $Q_0 = U_1 C_0$ , где  $U_1$  — показания вольтметра.

Если перевести переключатель  $\Pi_2$  в положение 2, то конденсатор  $C_0$  разрядится и через баллистический гальванометр пройдет заряд

$$Q_0 = U_1 C_0 = C_q \alpha_1,$$

где  $\alpha_1$  — угол отклонения подвижной части гальванометра.

Баллистическая постоянная гальванометра

$$C_q = U_1 C_0 / \alpha_1. \quad (7-10)$$

Если при положении 1 переключателя  $\Pi_2$  и положении 2 переключателя  $\Pi_1$  поднять напряжение до значения  $U_2$ ,

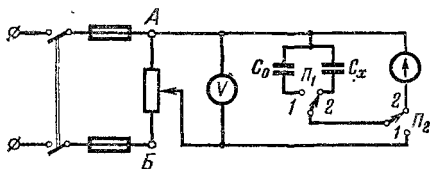


Рис. 7-7. Схема для измерения емкости баллистическим гальванометром.

то испытуемый конденсатор получит заряд

$$Q = U_2 C_x.$$

Перебросив нож переключателя  $\Pi_2$  из положения 1 в положение 2, конденсатор разрядится через гальванометр, т. е. через него пройдет заряд

$$Q = U_2 C_x = C_q \alpha_2$$

и подвижная часть его будет отброшена на угол  $\alpha_2$ .

Измеряемую емкость находят по формуле

$$C_x = \frac{C_q}{U_2} \alpha_2. \quad (7-11)$$

При измерении этим методом возможны значительные погрешности вследствие остаточного заряда (неполный заряд конденсатора).

#### 7-6. ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ (МИКРОФАРАДОМЕТРЫ)

Микрофарадометр представляет собой электродинамический логометр (рис. 7-8). Неподвижная катушка его  $A$  включена последовательно с конденсатором  $C$ . Ток в ней

равен:  $I = U\omega C$ . Две подвижные катушки 1 и 2 укреплены на оси прибора. Последовательно с первой катушкой включен образцовый конденсатор  $C_0$ . Ток в ней  $I_1 = U\omega C_0$ . Вторая катушка 2 замкнута на вторичную обмотку трансформатора тока, по первичной цепи которого проходит ток измеряемого конденсатора  $I_{Cx} = U\omega C_x$ . Ток во вторичной обмотке трансформатора и во второй подвижной катушке логометра равен или пропорционален току первичной цепи:  $I_2 = kU\omega C_x$ .

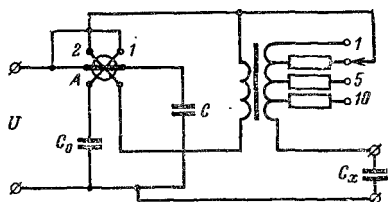


Рис. 7-8. Схема электродинамического микрофарад-метра.

Токи в катушках логометра (§ 2-3) совпадают по фазам, и, следовательно,  $\cos\psi_1 = \cos\psi_2 = 1$ .

Угол поворота подвижной части логометра [см. (2-19)]

$$\alpha = F \left( \frac{I_2}{I_1} \right) = F \left( \frac{kU\omega C_x}{U\omega C_0} \right) = F \left( \frac{C_x}{C_0} \right). \quad (7-12)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части зависит только от измеряемой емкости, и, следовательно, на шкале прибора можно нанести значения емкости.

Киевский завод «Точэлектроприбор» изготавливает электродинамические микрофарадометры типа Д524, класса точности 1. Они имеют четыре предела измерения: 1, 2, 5 и 10 мкФ. Изменение пределов достигается применением трансформатора тока с переменным числом витков в первичной обмотке, последовательно с которой включается измеряемый конденсатор.

## Б. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

### 7-7. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Четыре плеча моста переменного тока образуются четырьмя сопротивлениями  $z_1, z_2, z_3$  и  $z_4$  (рис. 7-9). В одну диагональ моста включается источник питания переменного тока, в другую — нулевой индикатор  $I$ . При нулевом показании индикатора потенциалы  $\phi_B$  и  $\phi_D$  одинаковы и, следовательно, можно написать:

$$\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_2 Z_3 \text{ и } \dot{I}_1 Z_2 = \dot{I}_2 Z_4.$$

Поделив почленно одно уравнение на другое, получим условия равновесия моста:

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4 \text{ или } Z_1Z_4 = Z_2Z_3. \quad (7-13)$$

Уравнение (7-13) в показательной форме имеет вид:

$$z_1z_4e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2z_3e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}. \quad (7-14)$$

Последнее уравнение можно заменить двумя:

$$z_1z_4 = z_2z_3; \quad (7-15)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (7-16)$$

Два написанных уравнения выражают два условия равновесия моста: 1) произведение полных сопротивлений одной пары противолежащих плеч должно быть равно произведению полных сопротивлений другой пары противолежащих плеч (7-15); 2) сумма фазных углов одной пары комплексных сопротивлений противолежащих плеч должна быть равна сумме фазных углов комплексных сопротивлений другой пары противолежащих плеч (7-16).

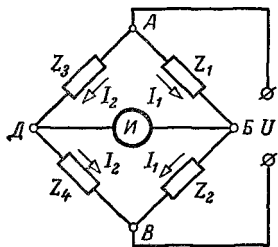


Рис. 7-9. Схема моста переменного тока.

Широкое применение получили мосты, у которых два плеча содержат активные сопротивления ( $r$ ), а два других — реактивные ( $X_L$ ,  $X_C$ ). Для таких мостов на основании (7-16) можно утверждать: 1) при наличии двух смежных плеч с активными сопротивлениями (рис. 7-10,а), например  $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$ , два других должны содержать или индуктивности или емкости (рис. 7-10,б), так как необходимо выполнить равенство  $\varphi_1 = \varphi_2$ ;

2) при наличии двух противолежащих плеч с активными сопротивлениями, например  $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ , два других должны содержать одно индуктивность  $L$ , другое емкость  $C$  (рис. 7-11), так как необходимо выполнить  $\varphi_1 + \varphi_4 = 0$ , что возможно при  $\varphi_1 = -\varphi_4$  или  $\varphi_4 = -\varphi_1$ .

Следовательно, мостовую схему можно применить для сравнения между собой: а) индуктивностей, б) емкостей или в) для сравнения индуктивности с емкостью.

Если в уравнение равновесия моста входят активное сопротивление, индуктивность и емкость, а частота тока

не входит, то мост называется частотно-независимым, а при наличии частоты — частотно-зависимым.

Частотно-независимые мосты, уравновешенные при определенной частоте, сохраняют равновесие и при других частотах, следовательно, они могут работать при несинусоидальных токах и напряжениях.

Частотно-зависимые мосты могут работать только при синусоидальной кривой напряжения.

Равновесие моста переменного тока определяется двумя уравнениями, поэтому для достижения равновесия необ-

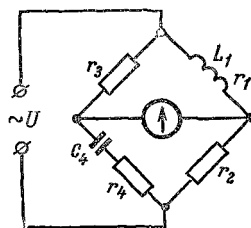
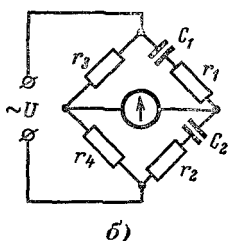
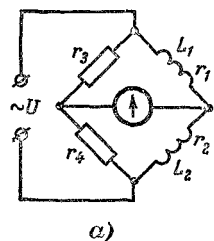


Рис. 7-10. Схемы мостов с реактивными сопротивлениями в смежных плечах.

Рис. 7-11. Схема моста с реактивными сопротивлениями в противоположащих плечах.

ходима регулировка не менее двух параметров схемы. Уравновешивание моста заключается в попеременной регулировке двух его параметров. Свойство моста, определяющее число необходимых для уравновешивания попеременных регулировочных операций, называется сходимостью моста. Хорошая сходимость обозначает малое число операций и, следовательно, сокращение процесса измерения. Сходимость определяется типом моста и выбором регулируемых элементов.

## 7-8. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ

а) Мост для измерения индуктивности путем сравнения ее с образцовой индуктивностью

Первое плечо моста (рис. 7-12) состоит из катушки с сопротивлением  $r_x$  и измеряемой индуктивностью  $L_x$  и магазина сопротивлений  $r_1$ .

Второе плечо состоит из образцовой катушки с сопротивлением  $r_0$  и индуктивностью  $L_0$  и магазина резисторов  $r_2$ . Иногда вместо двух магазинов резисторов  $r_1$  и  $r_2$  берут один, который переключателем можно включить в первое или второе плечо. Плечи моста  $r_3$  и  $r_4$  представляют собой магазинные резисторы. В диагональ  $AB$  можно включать источник питания постоянного или переменного тока, в диагональ  $BD$  — гальванометр постоянного или переменного тока.

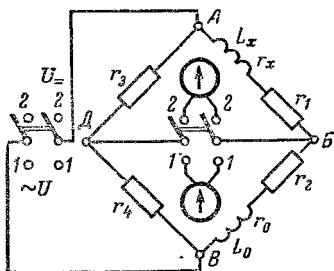


Рис. 7-12. Схема моста для измерения индуктивности.

Изменяя сопротивления  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  и  $r_4$ , можно уравновесить мост на переменном токе. Для этого случая согласно (7-13) напишем:

$$[(r_1 + r_x) + j\omega L_x] r_4 = [(r_2 + r_0) + j\omega L_0] r_3,$$

откуда первое условие равновесия моста

$$(r_1 + r_x) r_4 = (r_2 + r_0) r_3 \text{ или} \\ (r_1 + r_x)/(r_2 + r_0) = r_3/r_4. \quad (7-17)$$

Второе условие равновесия

$$r_4 j\omega L_x = r_3 j\omega L_0 \text{ или} \\ L_x/L_0 = r_3/r_4. \quad (7-18)$$

Следовательно, для равновесия моста необходима регулировка сопротивлений  $r_3$  и  $r_4$ , при которой их отношение равно отношению индуктивностей  $L_x$  и  $L_0$ , и сопротивлений  $r_1 + r_x$  и  $r_2 + r_0$ , при которой их отношение равно отношению сопротивлений  $r_3$  и  $r_4$ . Первая из этих регулировок производится на переменном токе, вторая — на постоянном.

Для регулировки ставят оба переключателя (рис. 7-12) в положение 1 — 1 и регулируют сопротивления  $r_3$  и  $r_4$  до получения наименьшего показания гальванометра. Затем ставят переключатели в положение 2 — 2 и регу-

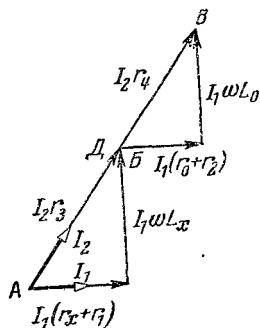


Рис. 7-13. Векторная диаграмма уравновешенного моста.



лируют сопротивления  $r_1$  и  $r_2$ , также стремясь получить наименьшее отклонение гальванометра. Далее снова ставят переключатели в положение  $I - I$  и регулируют сопротивления  $r_3$  и  $r_4$  и т. д. После нескольких регулировок сопротивлений  $r_1, r_2, r_3$  и  $r_4$  мост уравнивают на постоянном и переменном токе. При достижении равновесия вычисляют искомую индуктивность по (7-18):  $L_x = L_0 r_3 / r_4$ .

При низкой частоте добротности плеч моста  $\omega L_x / (r_x + r_1)$  и  $\omega L_0 / (r_0 + r_2)$  малы и схема имеет плохую сходимость. Векторная диаграмма уравновешенного моста дана на рис. 7-13.

б) Мост для измерения индуктивности путем сравнения ее с емкостью

Первое плечо моста (рис. 7-14) состоит из катушки с измеряемой индуктивностью  $L_x$  и сопротивлением  $r_x$ . Второе и третье плечи выполнены из безреактивных магазинов сопротивлений. Четвертое плечо состоит из образцового конденсатора  $C_0$  и параллельно включенного магазина сопротивлений  $r_0$ .

Таким образом, сопротивления плеч моста:

$$Z_1 = r_x + j\omega L_x; \quad Z_2 = r_2; \quad Z_3 = r_3;$$

$$Z_4 = \frac{1}{\frac{r_0}{j\omega C_0} + \frac{1}{r_0}} = \frac{r_0}{1 + j\omega C_0 r_0}.$$

Подставив выражения сопротивлений плеч в (7-13), получим:

$$(r_x + j\omega L_x) / r_2 = r_3 (1 + j\omega C_0 r_0) / r_0,$$

откуда условия равновесия моста

$$r_x / r_2 = r_3 / r_0 \quad \text{и} \quad \omega L_x / r_2 = \omega C_0 r_3.$$

Из написанных соотношений получаются выражения для измеряемых величин:

$$L_x = C_0 r_2 r_3 \quad (7-19)$$

и

$$r_x = r_2 r_3 / r_0. \quad (7-20)$$

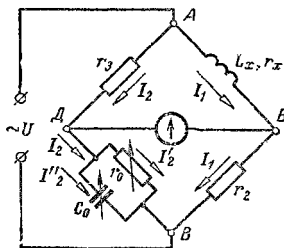


Рис. 7-14. Схема моста для измерения индуктивности путем сравнения ее с емкостью.

Добротность катушки

$$Q = \omega L_x / r_x = \omega C_0 r_0. \quad (7-21)$$

На рис. 7-15 показана векторная диаграмма уравновешенного моста.

Равновесие моста можно получить регулировкой  $C_0$  и  $r_0$  или  $r_3$  и  $r_0$ . Недостаток моста — плохая сходимость при низких добротностях измеряемых катушек.

Кроме четырехплечих мостов, применяются шестиплечие. На рис. 7-16 в качестве примера дана

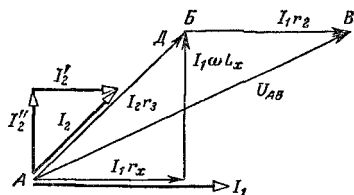


Рис. 7-15. Векторная диаграмма уравновешенного моста.

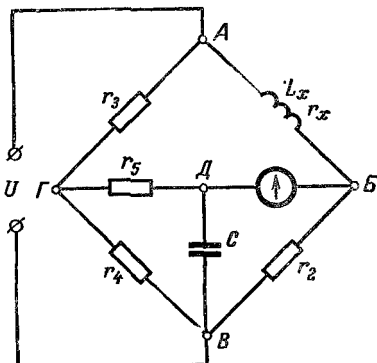
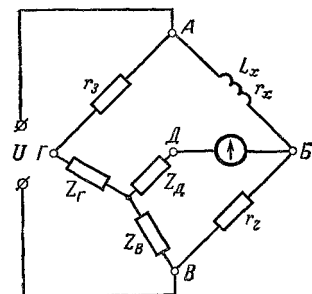


Рис. 7-16. Схема шестиплечего моста для измерения индуктивности.

схема для измерения индуктивности, применяемая в мосте типа Р50-1. Заменяв треугольник сопротивлений  $r_4, r_5, r_x$



эквивалентной звездой с сопротивлениями  $Z_r, Z_D, Z_B$  (рис. 7-17), получим четырехплечий мост, для которого, как и прежде, можно написать условия равновесия и формулы для опреде-

Рис. 7-17. Преобразованная схема шестиплечего моста.

ления измеряемых величин:

$$r_x = r_2 r_3 / r_4 \quad (7-22)$$

и

$$L_x = C [r_2 r_3 + r_5 (r_x + r_2)]. \quad (7-23)$$

Для уравновешивания моста сначала регулируют сопротивление  $r_4$ , выполняя условие  $r_x r_4 = r_2 r_3$ . Затем

регулируют  $r_5$ , выполняя второе условие  $L_x/C = r_2 r_3 + r_5 (r_x + r_2)$ , при этом первое условие не нарушается, так как сопротивление  $r_5$  не входит в выражение первого условия. Поэтому мост имеет хорошую сходимость.

### 7-9. ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ

Одна из схем моста для измерения взаимной индуктивности дана на рис. 7-18. В неразветвленную часть цепи и в первое плечо моста включены индуктивно связанные (испытываемые) катушки. Остальные плечи — безреактивные магазины сопротивлений. Токи на схеме (рис. 7-18) обозначены для режима равновесия моста (ток в гальванометре равен нулю). При этом имеем:

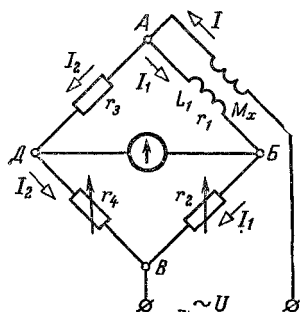


Рис. 7-18. Схема моста для измерения взаимной индуктивности.

$$\dot{I}_1 r_2 = \dot{I}_2 r_4; \quad (7-24)$$

$$\dot{I}_1 (r_1 + j\omega L_1) + j\omega \dot{I} M_x = \dot{I}_2 r_3.$$

Приравняв вещественные и мнимые слагающие правой и левой частей написанного уравнения, получим:

$$\dot{I}_1 r_1 = \dot{I}_2 r_3$$

и

$$j\dot{I}_1 \omega L_1 + j\omega \dot{I} M_x = 0$$

или

$$\dot{I}_1 L_1 = -\dot{I} M_x.$$

Таким образом, равновесие моста возможно только при встречном соединении катушек, при равенстве э. д. с. самоиндукции и э. д. с. взаимной индукции, когда они компенсируют друг друга и, следовательно, фазный угол  $\varphi_1 = 0$ .

Из последнего уравнения взаимная индуктивность

$$M_x = -L_1 \dot{I}_1 / \dot{I}.$$

Приняв начальную фазу комплексного тока  $\dot{I}_1$  равной нулю, т. е.  $\dot{I}_1 = I_1$ , и учитывая, что в первой и второй

ветвях моста токи совпадают по фазе с напряжениями, т. е.  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ , запишем  $I = I_1 + I_2$ .

Следовательно,

$$M_x = L_1 \frac{I_1}{I_1 + I_2} = L_1 \frac{1}{1 + \frac{I_2}{I_1}} = L_1 \frac{1}{1 + \frac{r_2}{r_4}}, \quad (7-25)$$

так как согласно (7-24)  $I_2/I_1 = r_2/r_4$ .

Измерять взаимную индуктивность можно и мостом переменного тока для измерения индуктивности, применяя метод последовательного соединения катушек (§ 7-3, б).

#### 7-10. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ МОСТОМ

Одна из схем моста переменного тока для измерения емкости дана на рис. 7-19, а.

Первое плечо моста образуется испытуемым конденсатором  $C_x$ , который можно заменить эквивалентной по-

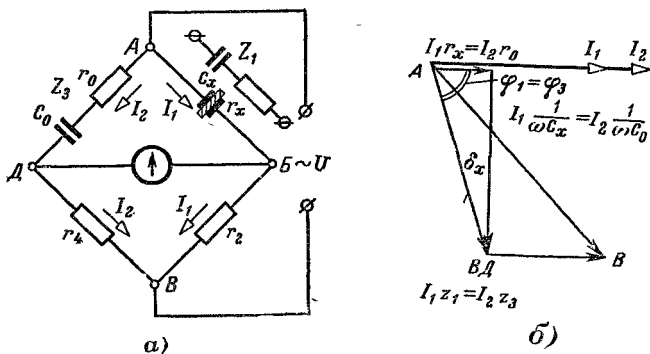


Рис. 7-19. Мост для измерения емкости.

а — схема; б — векторная диаграмма для уравновешенного моста.

следовательной схемой. Третье плечо состоит из образцового конденсатора  $C_0$  без потерь (воздушный конденсатор) и магазина сопротивлений  $r_0$ . Второе и четвертое плечи моста выполнены из магазина сопротивлений  $r_2$  и  $r_4$ . В одну диагональ включается источник питания переменного тока, в другую — нулевой индикатор.

Для уравновешенного моста согласно (7-13) можно написать:

$$\left( r_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) r_4 = \left( r_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right) r_2.$$

Приравняв отдельно вещественные и мнимые слагающие, получим:

$$r_x r_4 = r_0 r_2 \quad (7-26)$$

и 
$$r_4 / (j\omega C_x) = r_2 / (j\omega C_0) \text{ или } r_4 / C_x = r_2 / C_0. \quad (7-27)$$

Следовательно, из (7-27) измеряемая емкость

$$C_x = C_0 r_4 / r_2 \quad (7-28)$$

Для уравнивания моста устанавливают  $r_0 = 0$  и, изменяя  $r_4$  и  $r_2$ , получают наименьший ток в гальванометре. Затем, не изменяя  $r_4$  и  $r_2$ , регулируют сопротивление  $r_0$ , уменьшая ток в гальванометре. Далее, не изменяя  $r_0$ , регулируют  $r_2$  и  $r_4$  и так далее до получения равновесия.

Уравневав мост, искомую емкость определяют по (7-28). Тангенс угла потерь можно определить из векторной диаграммы уравновешенного моста (рис. 7-19, б):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta_x &= \operatorname{tg} \delta_0 = \\ &= \frac{I_2 r_0}{I_2 \frac{1}{\omega C_0}} = r_0 \omega C_0. \end{aligned} \quad (7-29)$$

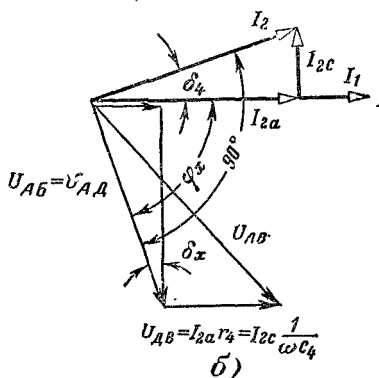
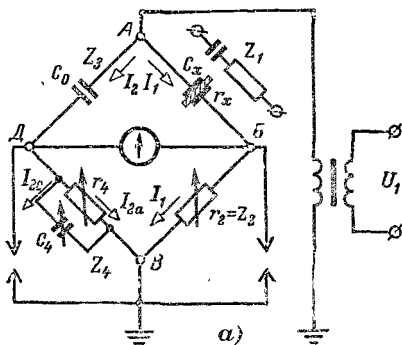


Рис. 7-20. Схема высоковольтного моста для измерения емкости и угла потерь (а) и его векторная диаграмма (б).

Если потерями в конденсаторе можно пренебречь ( $r_x = 0$ ), то сопротивление  $r_0$  становится ненужным и, следовательно, согласно (7-13) получим:

$$\frac{1}{\omega C_x} r_4 = \frac{1}{\omega C_0} r_2 \text{ или } \frac{r_4}{C_x} = \frac{r_2}{C_0},$$

откуда  $C_x = C_0 r_4 / r_2$ , т. е. снова получаем (7-28).

При испытании кабелей и других элементов высоковольтных установок часто пользуются высоким напряжением для питания моста (рис. 7-20, а). Безопасность работы обеспечивается низким напряжением (относительно земли) на регулируемых плечах. Для устранения опасности появления высокого напряжения на этих плечах при пробое изоляции конденсатора к точкам моста *БД* присоединяются искровые разрядники, которые при повышении напряжения пробиваются, заземляя регулируемые плечи моста.

В этой схеме (рис. 7-20, а) первое плечо моста ( $Z_1$ ) представляет собой испытуемый кабель, который можно заместить последовательной эквивалентной схемой. Второе плечо ( $Z_2$ ) состоит из магазина сопротивлений  $r_2$ . Третье плечо ( $Z_3$ ) образуется конденсатором без потерь, а четвертое ( $Z_4$ ) — магазином сопротивлений и магазином емкостей. Мост питается от вторичной обмотки высоковольтного трансформатора. Уравновешивание моста производится регулировкой  $C_4$  и отношения  $r_4/r_2$ .

Воспользовавшись уравнением (7-13) и действуя аналогично предыдущему, можно показать, что для данного уравновешенного моста искомая емкость также определяется по (7-28), т. е.  $C_x = C_0 r_4/r_2$ .

Из векторной диаграммы для уравновешенного моста (рис. 7-20, б) можно написать:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_4 = \frac{I_1 r_x}{I_1 \frac{1}{\omega C_x}} = \frac{U_{\text{д.в}} \omega C_4}{U_{\text{д.в}} \frac{1}{r_4}} = r_4 \omega C_4 = r_x \omega C_x. \quad (7-30)$$

## Г л а в а   в о с ь м а я

### ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

#### 8-1. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Мощность цепи постоянного тока можно определить, измерив напряжение на зажимах цепи вольтметром и ток в ней амперметром. Их произведение и будет равно мощности этой цепи:

$$P = UI.$$

Этот способ не точен, имеет ряд недостатков и применяется редко.

Удобней и точнее измерять мощность электродинамическим ваттметром (рис. 8-1), измерительный механизм которого рассмотрен в § 2-3. Неподвижная катушка (рис. 8-1) включается последовательно с приемником энергии. Поэтому она называется последовательной или катушкой тока. Подвижная катушка вместе с добавочным сопротивлением включается параллельно приемникам энергии на напряжение цепи  $U$ . Поэтому она назы-

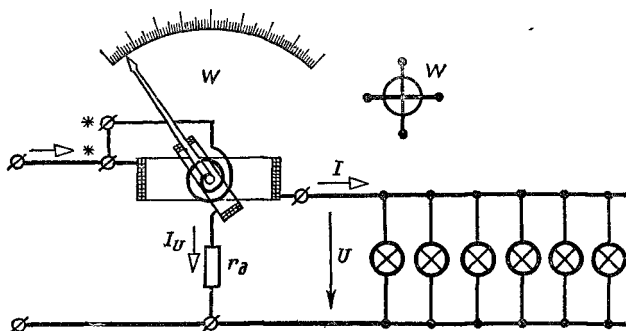


Рис. 8-1. Схема устройства и соединения электродинамического ваттметра и обозначение измерительного механизма ваттметра.

вается параллельной цепью или цепью напряжения. Сопротивление параллельной цепи  $r_U$  вследствие применения добавочного сопротивления постоянно. По параллельной цепи проходит ток  $I_U = U/r_U$ , пропорциональный напряжению.

Угол поворота подвижной части ваттметра [см. (2-15)]

$$\alpha = k_2 I I_U = k_2 I U / r_U = k_3 I U = k_3 P, \quad (8-4)$$

т. е. он пропорционален мощности. Следовательно, шкала ваттметра равномерная.

Изменение направления тока в одной из катушек вызывает изменение направления вращающего момента и направления поворота подвижной части, что делает отсчет по шкале невозможным, так как шкала прибора односторонняя. Поэтому следует различать зажимы ваттметра.

Зажим последовательной обмотки, соединяемый с источником питания, называется генераторным.

Зажим параллельной цепи, соединяемый с последовательной катушкой, также называется генераторным. Генераторные зажимы отмечаются звездочками. Следовательно,

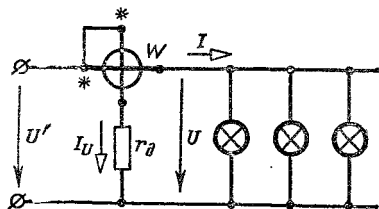


Рис. 8-2. Схема соединения ваттметра.

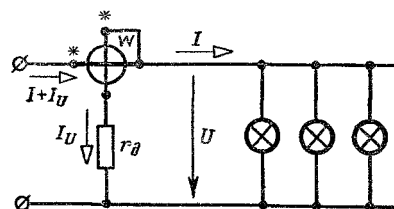


Рис. 8-3. Схема соединения ваттметра.

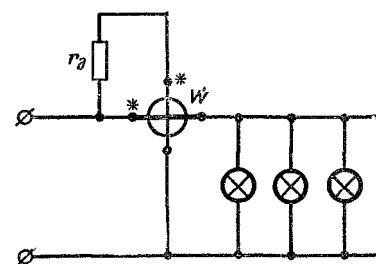


Рис. 8-4. Неправильная схема соединения ваттметра.

при правильном включении ваттметра токи в его катушках направлены от генераторных зажимов к зажимам, называемым нагрузочными.

В схеме на рис. 8-2 параллельная цепь ваттметра находится под напряжением  $U'$ , большим, чем напряжение приемников  $U$  на падение напряжения в последовательной катушке, ток которой равен току приемников  $I$ . Следовательно,

$$P_W = IU' = I(U + U_I) = IU + IU_I, \quad (8-2)$$

таким образом, мощность, измеряемая ваттметром, равна мощности приемников, подлежащей измерению, и мощности последовательной катушки ваттметра.

В схеме на рис. 8-3 ток в последовательной катушке ваттметра больше тока  $I$  в приемниках на значение тока  $I_U$  в параллельной цепи ваттметра, напряжение на которой

равно напряжению приемников. Следовательно,

$$P_W = U(I + I_U) = UI + UI_U, \quad (8-3)$$

т. е. мощность, измеряемая ваттметром, равна мощности приемников энергии и мощности параллельной цепи ваттметра.



При точных измерениях вводят поправки в результат измерения, обусловленные мощностью его обмотки. При меньшей точности измерений, когда поправки не вводятся, пользуются схемой рис. 8-2, так как обычно мощность последовательной обмотки меньше, чем параллельной, и показания ваттметра будут более точными.

На рис. 8-4 генераторные зажимы ваттметра соединены неправильно через добавочное сопротивление, и, следовательно, разность потенциалов между концами катушек равна напряжению сети (240—600 В). Таким образом, изоляция катушек, находящихся близко одна от другой, подвергается опасности пробоя. Кроме того, может возникнуть дополнительная погрешность вследствие электростатического взаимодействия между катушками ваттметра.

## 8-2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАТТМЕТР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Если включить электродинамический ваттметр в цепь переменного тока с напряжением

$$u = U_m \sin \omega t$$

и током

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

то ток в катушке напряжения

$$\begin{aligned} i_U &= \frac{U_m}{z_U} \sin (\omega t - \varphi_U) = \\ &= I_{Um} \sin (\omega t - \varphi_U), \end{aligned}$$

т. е. он отстает по фазе от напряжения на угол (рис. 8-5), тангенс которого  $\operatorname{tg} \varphi_U = x_U/r_U$ .

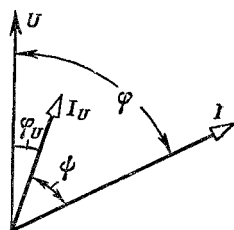


Рис. 8-5. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра.

Угол поворота подвижной части ваттметра [см. (2-18)]

$$\alpha = k_2 I I_U \cos (\varphi - \varphi_U). \quad (8-4)$$

Если сопротивление цепи напряжения  $z_U$  неизменно, то ток  $I_U$  пропорционален напряжению  $U$ , следовательно,

$$\alpha = k_2 I \frac{U}{z_U} \cos (\varphi - \varphi_U) = k_3 I U \cos (\varphi - \varphi_U). \quad (8-5)$$

При токе  $I_U$ , совпадающем по фазе с напряжением  $U$ , т. е. при  $\varphi_U = 0$ ,

$$\alpha = k_3 U I \cos \varphi = k_3 P, \quad (8-6)$$

т. е. угол поворота подвижной части ваттметра пропорционален активной мощности. Кроме того, при равенстве полного сопротивления цепи напряжения ее активному сопротивлению ( $z_U = r_U$ ) показания ваттметра будут одинаковы в цепи постоянного и переменного тока. Это дает возможность производить градуировку и поверку ваттметра на постоянном токе.

Если ток в параллельной цепи ваттметра совпадает по фазе с напряжением ( $\varphi_U = 0$ ), то показания ваттметра  $P = UI \cos \varphi$  определяют значение измеряемой мощности.

При  $\varphi_U \neq 0$  появляется погрешность измерений, называемая угловой погрешностью ваттметра

$$\begin{aligned} \gamma_P &= \frac{P' - P}{P} \cdot 100\% = \frac{UI \cos(\varphi - \varphi_U) - UI \cos \varphi}{UI \cos \varphi} \cdot 100\% = \\ &= \left[ \frac{\cos(\varphi - \varphi_U)}{\cos \varphi} - 1 \right] \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (8-7)$$

Используя известную формулу косинуса разности углов, получаем:

$$\begin{aligned} \gamma_P &= \left[ \frac{\cos \varphi \cos \varphi_U + \sin \varphi \sin \varphi_U}{\cos \varphi} - 1 \right] \cdot 100\% = \\ &= (\cos \varphi_U + \sin \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) \cdot 100\%. \end{aligned}$$

Угол  $\varphi_U$  мал, поэтому  $\cos \varphi_U \approx 1$  и  $\sin \varphi_U \approx \varphi_U$ . При указанных допущениях имеем:

$$\begin{aligned} \gamma_P &= (\cos \varphi_U + \sin \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) \cdot 100\% = \\ &= (1 + \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) \cdot 100\% = 100\% \varphi_U \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned}$$

Если  $\varphi_U$  выразить в минутах (1 рад = 3438 мин), то получим:

$$\gamma_P = \frac{100\%}{3438} \varphi_U \operatorname{tg} \varphi = 0,0291 \varphi_U \operatorname{tg} \varphi, \%. \quad (8-8)$$

Угловая погрешность ваттметра зависит от угла  $\varphi_U$  и от угла сдвига фазы между током и напряжением в измеряемой цепи. Погрешность измерения, пропорциональная  $\operatorname{tg} \varphi$ , очень велика при больших углах  $\varphi$ . Например, при углах сдвига  $84^\circ 20'$  и  $88^\circ 50'$  погрешности будут соответственно в 10 и 50 раз больше по сравнению с погрешностью при угле в  $45^\circ$ .

Электродинамические ваттметры выполняются на один или два номинальных тока последовательной цепи. В последнем случае токовая катушка состоит из двух одинако-

вых секций, которые соединяются последовательно или параллельно аналогично соединениям катушек электродинамического амперметра (рис. 3-30). Переключение секций производится рычажным или штепсельным переключателем.

В параллельной цепи ваттметра добавочный резистор также выполняют из нескольких секций, чтобы получить несколько номинальных напряжений (150—300—600 В). Параллельные

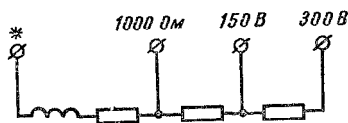


Рис. 8-6. Простейшая схема параллельной цепи электродинамического ваттметра.

цепи некоторых ваттметров имеют зажим с отметкой 1000 Ом, соответствующий напряжению 30 В. Он предназначается для присоединения наружных добавочных резисторов.

Параллельная цепь ваттметров, погрешность которых до  $\pm 0,5\%$ , состоит из подвижной катушки и безреактивного добавочного резистора (рис. 8-6). У более точных ваттметров параллельная цепь имеет более сложную схему с компенсацией погрешностей от температуры и частоты.

Защита от внешних магнитных полей выполняется экранированием или применением астатических измерительных механизмов.

При включении ваттметра в цепь переменного тока необходимо обеспечить правильное включение генераторных зажимов ваттметра, при котором положительные направления токов в катушках ваттметра будут от генераторных зажимов к нагрузочным.

Поменяв местами зажимы последовательной обмотки ваттметра, получим изменение фазы тока в ней на  $180^\circ$  (рис. 8-7, а), а поменяв местами зажимы

Рис. 8-7. Векторные диаграммы ваттметра при различных включениях его обмоток.

а — изменение фазы тока на  $1/2 T$ ; б — изменение фазы напряжения на  $1/2 T$ .

параллельной цепи, получим изменение фазы напряжения на  $180^\circ$  (рис. 8-7, б).

В том и другом случае сдвиг фазы между током  $I$  и напряжением  $U$  ваттметра будет равен  $180^\circ - \varphi$ , а угол

поворота подвижной части будет отрицательным, так как

$$\alpha = k_3 UI \cos(180^\circ - \varphi) = -k_3 UI \cos \varphi, \quad (8-9)$$

т. е. подвижная часть отклонится в обратную сторону, где делений шкалы нет.

Определение мощности по показанию ваттметров высоких классов точности производится (§ 1-4, в) умножением постоянной ваттметра на отсчет.

Так как ваттметры градуируются так, что при  $I_n$ ,  $U_n$  и  $\cos \varphi = 1$  дают полное отклонение стрелки  $\alpha_n$ , постоянная для данной схемы находится по формуле

$$C_P = U_n I_n / \alpha_n. \quad (8-10)$$

Сдвинув ток в параллельной катушке электродинамического ваттметра по фазе от напряжения на зажимах параллельной цепи ваттметра на угол  $90^\circ$  ( $\varphi_U = 90^\circ$ , рис. 8-8), получим угол поворота подвижной части ваттметра:

$$\begin{aligned} \alpha &= k_3 UI \cos(90^\circ - \varphi) = \\ &= k_3 UI \sin \varphi = k_3 Q, \end{aligned} \quad (8-11)$$

т. е. пропорциональным реактивной мощности.

Для получения сдвига в  $90^\circ$  между током  $I_U$  и напряжением  $U$  применяют одну из искусственных схем (рис. 8-9). Для этих схем характерна зависимость показаний ваттметра от частоты тока, так как от нее зависят реактивные сопротивления и сдвиг фаз между током и напряжением в параллельной цепи ваттметра.

К положительным свойствам электродинамических ваттметров относятся высокая точность (классы точности 0,1—0,2—0,5); пригодность для постоянного и переменного тока 45—60—500 Гц и выше.

К недостаткам относятся слабое магнитное поле, небольшой вращающий момент, чувствительность к внешним магнитным полям, чувствительность к перегрузкам, высокая стоимость.

Отечественная промышленность изготавливает много электродинамических ваттметров различных типов, например: Д57 класса точности 0,1; Д533 класса точности 0,2;

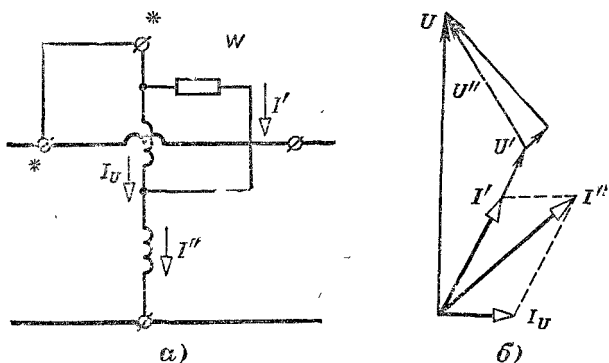


Рис. 8-9. Схема для получения тока в параллельной катушке ваттметра, сдвинутого по фазе на  $90^\circ$  относительно напряжения (а), и векторная диаграмма параллельной цепи указанной схемы (б).

Д568 класса точности 0,5. Для измерения мощности в цепях с большим сдвигом ( $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,1$ ) служит ваттметр типа Д542 класса точности 0,5.

### 8-3. ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАТТМЕТР

Ферродинамический ваттметр имеет измерительный механизм системы того же названия (§ 2-4). Неподвижная катушка его служит катушкой тока, подвижная — катушкой напряжения.

В магнитопроводе из ферромагнитного материала при меньшей н. с. возникает большой магнитный поток, а следовательно, большим будет и вращающий момент, что обеспечивает получение более прочной подвижной части. Далее, увеличение магнитного потока делает прибор малочувствительным к внешним магнитным полям. Кроме того, появляются слагающие основной погрешности: от нелинейности кривой намагничивания, от вихревых токов и от гистерезиса.

Потери в стальном сердечнике вызывают отставание по фазе последовательного магнитного потока  $\Phi_I$  от тока  $I$

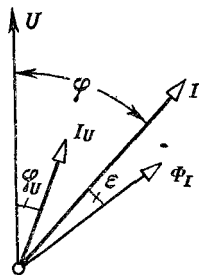


Рис. 8-10. Векторная диаграмма ферродинамического ваттметра.

этой цепи на угол  $\varepsilon$  (рис. 8-10). Поэтому выражение угла поворота подвижной части [см. (8-4)] будет:

$$\alpha = k_2 II_U \cos(\varphi + \varepsilon - \varphi_U) = k_3 IU \cos(\varphi + \varepsilon - \varphi_U). \quad (8-12)$$

Выполнив условие  $\varphi_U = \varepsilon$ , получим:

$$\alpha = k_3 IU \cos \varphi_U = k_3 P,$$

т. е. угловая погрешность ваттметра будет равна нулю.

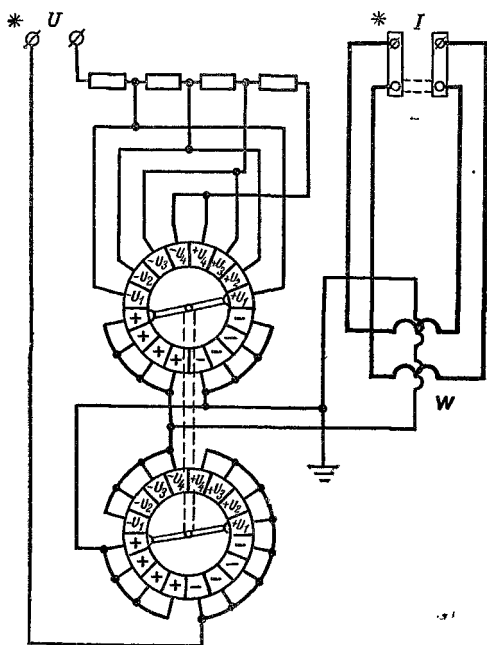


Рис. 8-11. Схема ферродинамического ваттметра типа Д539.

Для выполнения условия  $\varphi_U = \varepsilon$  при относительно больших значениях угла  $\varepsilon$  угол  $\varphi_U$  увеличивают, применяя добавочный резистор, выполненный частично или полностью не с бифилярной, а с обычной унифилярной обмоткой, как, например, у ваттметров типа Д539.

Погрешности от гистерезиса и вихревых токов снижают точность этих ваттметров (класс 1,5). Изготавливая магнитопровод из пермаллоя, можно получить ваттметры, удовлетворяющие требованиям класса 0,5.

Схема ваттметра типа Д539 дана на рис. 8-11.

Ваттметр имеет: а) два номинальных тока с наименьшими значениями 10—20 мА и наибольшими — 5—10 А; б) четыре номинальных напряжения 30—75—150 и 300 В или 75—150—300—600 В. Они пригодны для постоянного и переменного тока с частотой 45—65—500 Гц.

Магнитопровод из пермаллоя и растяжки для крепления подвижной части позволили уменьшить номинальный ток в параллельной цепи до 3,0 мА. Мощность последовательной цепи равна 0,15 Вт.

#### 8-4. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ВАТТМЕТРОМ С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

##### а) Измерение мощности ваттметром с трансформатором тока

Измерение мощности в низковольтных цепях с большими токами производится ваттметром с трансформатором тока (рис. 8-12).

Первичная обмотка трансформатора тока соединяется последовательно с приемником энергии. К зажимам вто-

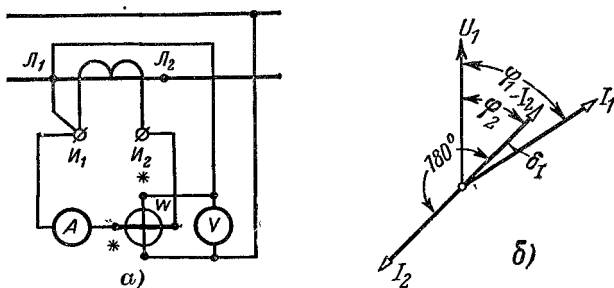


Рис. 8-12. Схема соединения ваттметра с трансформатором тока (а) и векторная диаграмма для указанной цепи (б).

ричной обмотки присоединяются последовательно соединенные амперметр и токовая цепь ваттметра. Параллельная цепь ваттметра и вольтметр присоединяются к проводам первичной цепи.

Зажимы трансформатора  $L_1$  и  $I_1$  соединяются между собой, чтобы генераторные зажимы ваттметра имели один потенциал. Ввиду этого вторичную обмотку трансформатора тока заземлять нельзя.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы (рис. 8-12, б), напомним выражение мощности, измеряемой ваттметром:

$$P_W = I_2 U_1 \cos \varphi_2.$$

Умножив это выражение на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока  $k_{HI}$ , получим:

$$P'_1 = P_W k_{HI} = I_2 k_{HI} U_1 \cos \varphi_2 = I_2 k_{HI} U_1 \cos (\varphi_1 - \delta_I).$$

Так как  $I_2 k_{HI} \approx I_1$  и  $\varphi_1 - \delta_I = \varphi_1$  вследствие малости  $\delta_I$ , то

$$P'_1 = P_W k_{HI} \approx I_1 U_1 \cos \varphi_1. \quad (8-13)$$

Таким образом, найденное значение мощности  $P'_1$ , равное произведению показаний ваттметра и номинального коэффициента трансформации трансформатора тока, приблизительно равно измеряемой мощности  $P_1$ .

У ваттметров, предназначенных для постоянной совместной работы с определенным трансформатором тока, на шкале наносятся значения мощности первичной цепи и указывается номинальный коэффициент трансформатора тока, с которым произведена градуировка.

Погрешность в измерении мощности, вызванная применением трансформатора тока, зависит от токовой погрешности трансформатора и угловой погрешности его.

Обозначив

$$P'_1 = I_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \delta),$$

напишем выражение для погрешности мощности, вызванной угловой погрешностью трансформатора:

$$\begin{aligned} \gamma_P &= \frac{P'_1 - P_1}{P_1} \cdot 100\% = \frac{I_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \delta) - I_1 U_1 \cos \varphi_1}{I_1 U_1 \cos \varphi_1} \cdot 100\% = \\ &= \left[ \frac{\cos (\varphi_1 - \delta)}{\cos \varphi_1} - 1 \right] \cdot 100\%. \end{aligned}$$

По аналогии с (8-7) и (8-8) получим:

$$\gamma_P = 0,0291 \delta \operatorname{tg} \varphi_1, \%. \quad (8-14)$$

Таким образом, погрешность измерения мощности, вызванная угловой погрешностью трансформатора тока, зависит не только от  $\delta$ , но и от угла сдвига между током и напряжением в первичной цепи.



б) Измерение мощности ваттметром с трансформаторами тока и напряжения

Измерение мощности в цепях высокого напряжения производится ваттметром с трансформаторами тока и напряжения (рис. 8-13).

Первичная обмотка трансформатора тока соединяется последовательно с приемником энергии; к зажимам вторичной обмотки присоединяются последовательно соединенные амперметр и токовая цепь ваттметра.

Первичная обмотка трансформатора напряжения соединяется с проводами первичной цепи; к зажимам вто-

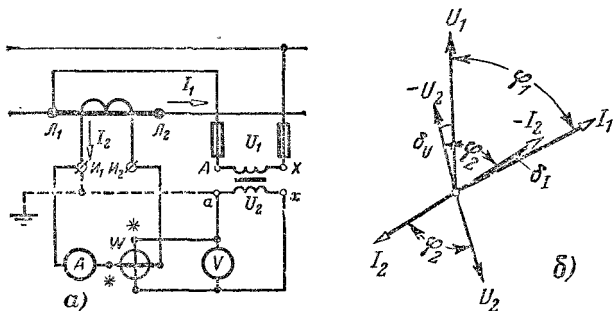


Рис. 8-13. Схема соединения ваттметра с измерительными трансформаторами (а) и векторная диаграмма (б).

ричной обмотки присоединяются вольтметр и цепь напряжения ваттметра. Один зажим каждой из вторичных обмоток измерительных трансформаторов и их корпуса заземляются.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы (рис. 8-13), напишем выражение мощности, измеряемой ваттметром:

$$P_W = I_2 U_2 \cos \varphi_2. \quad (8-15)$$

Умножив (8-15) на произведение номинальных коэффициентов трансформации трансформаторов, получим:

$$\begin{aligned} P'_1 &= P_W k_{HI} k_{HU} = I_2 k_{HI} U_2 k_{HU} \cos \varphi_2 = \\ &= I_2 k_{HI} U_2 k_{HU} \cos (\varphi_1 + \delta_U - \delta_I). \end{aligned}$$

Так как

$$I_2 k_{HI} \approx I_1; \quad U_2 k_{HU} \approx U_1$$

и ввиду малости  $\delta_I$  и  $\delta_U$  принимаем:

$$\varphi_1 + \delta_U - \delta_I \approx \varphi_1.$$

При указанных допущениях

$$P'_1 = P_W k_{nI} k_{nU} \approx I_1 U_1 \cos \varphi_1 = P_1.$$

Таким образом, найденное значение мощности  $P'_1$ , равное произведению показаний ваттметра и номинальных коэффициентов трансформации измерительных трансформаторов, приблизительно равно мощности первичной цепи, подлежащей измерению.

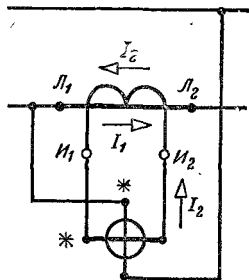


Рис. 8-14. Правильная схема соединения ваттметра с трансформатором тока.

Погрешность в измерении мощности, вызванная применением измерительных трансформаторов, зависит от погрешности в токе, погрешности в напряжении, от угловых погрешностей трансформаторов и угла сдвига фаз между током и напряжением в первичной цепи (8-14).

Соединение ваттметра с измерительными трансформаторами должно быть таким, чтобы ток в последовательной обмотке с точностью до  $\delta_I$  совпадал по фазе с током первичной цепи трансформатора тока, а напряжение на параллельной цепи ваттметра с точностью до  $\delta_U$  совпадало по фазе с напряжением первичной цепи трансформатора напряжения.

На рис. 8-14 дана правильная схема соединения ваттметра, при которой указательная стрелка ваттметра отклоняется от нуля шкалы вправо. На схеме стрелками показаны положительные направления токов.

На рис. 8-15 дана неправильная схема соединения ваттметра, в которой генераторный зажим цепи тока ваттметра присоединен не к зажиму  $I_1$ , а к зажиму  $I_2$  и нагрузочный зажим цепи тока присоединен не к зажиму  $I_2$ , а к зажиму  $I_1$  трансформатора тока. Вследствие этого фаза тока в последовательной цепи ваттметра изменилась на половину периода, вектор тока повернулся на  $180^\circ$  (рис. 8-15). При этой схеме соединения мощность, измеряемая ваттметром, равна:

$$P_W = I_2 U_1 \cos(180^\circ - \varphi) = -I_2 U_1 \cos \varphi,$$

и, следовательно, подвижная часть ваттметра отклонится в обратную сторону.

Сказанное о неправильном соединении цепи тока ваттметра и трансформатора тока относится также к

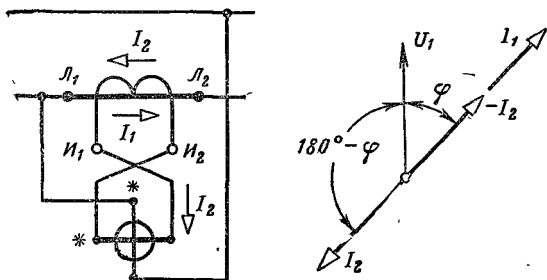


Рис. 8-15. Неправильная схема соединения ваттметра с трансформатором тока и векторная диаграмма для этой схемы.

параллельной цепи ваттметра и трансформатору напряжения.

Для облегчения монтажа измерительных цепей зажимы трансформаторов тока размечаются буквами  $L_1, L_2, I_1, I_2$ , а зажимы трансформаторов напряжения  $A, X, a, x$ .

Если зажимы трансформатора не размечены, то разметку их можно произвести следующим образом. К одной обмотке трансформатора присоединяют аккумулятор, реостат, рубильник, к другой — магнитоэлектрический прибор (рис. 8-16). Если при замыкании цепи (рубильника) стрелка прибора отклонится от нуля шкалы вправо, т. е. по шкале, то это укажет на то, что плюс аккумулятора и плюс прибора соединены с одними и теми же зажимами трансформатора, т. е. или с зажимами  $L_1$  и  $I_1$  или с зажимами  $L_2$  и  $I_2$ .

Если имеется трансформатор с размеченными зажимами, то разметку зажимов другого трансформатора (не имеющего разметки) производят, соединяя оба трансформатора по схеме рис. 8-17, а и б. При этом амперметр  $A_3$  измеряет ток  $I_3$ ,

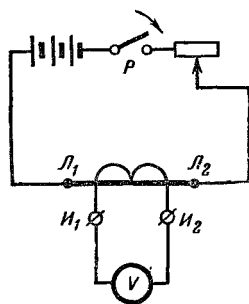


Рис. 8-16. Схема для разметки зажимов измерительных трансформаторов с применением аккумулятора и магнитоэлектрического прибора.

равный геометрической разности токов  $I_1$  и  $I_2$ , а вольтметр  $V_3$  измеряет напряжение  $U_3$ , равное геометрической разности напряжений  $U_1$  и  $U_2$ .

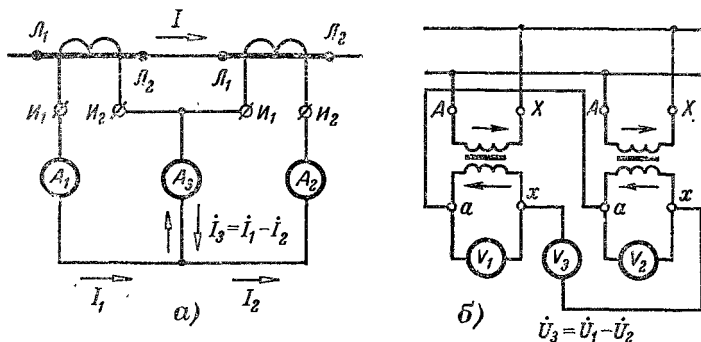


Рис. 8-17. Схема для разметки зажимов измерительных трансформаторов.

### 8-5. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

#### а) Измерение мощности в четырехпроводных цепях

Активную мощность  $P$  четырехпроводной трехфазной цепи можно выразить суммой мощностей  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  трех фаз, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{P} &= P_A + P_B + P_C = \\ &= I_A U_A \cos \varphi_A + \\ &+ I_B U_B \cos \varphi_B + \\ &+ I_C U_C \cos \varphi_C. \end{aligned}$$

Из написанного следует, что измерение активной

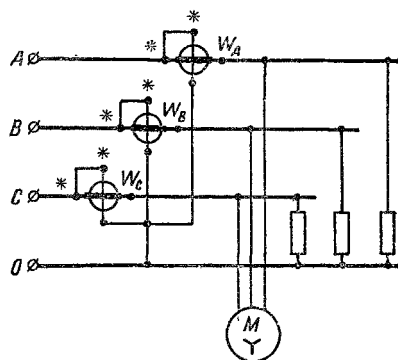


Рис. 8-18. Схема включения ваттметров в четырехпроводную трехфазную цепь.

ности мощности цепи можно произвести тремя ваттметрами, каждый из которых измеряет мощность одной фазы (рис. 8-18).

Удобней пользоваться трехэлементным ваттметром. Устройство одного из них (ферродинамической системы) показано на рис. 2-19. Ваттметр имеет три неподвижные катушки и три подвижные, укрепленные на одной оси. Если ваттметр включен в цепь (рис. 8-18), то вращающий момент, действующий на каждую из подвижных катушек, будет пропорционален мощности соответствующей фазы. Результирующий вращающий момент, равный сумме отдельных моментов, будет пропорционален активной мощности четырехпроводной цепи трехфазного тока. Этой же мощности будет пропорционален и угол поворота подвижной части ваттметра.

*б) Измерение мощности в трехпроводных цепях при равномерной нагрузке фаз*

Если система напряжений симметрична, а сопротивления фаз нагрузки одинаковы (равномерная нагрузка), то, измерив мощность одной фазы и умножив ее на 3, получим мощность трехфазной цепи. Рассмотрим несколько случаев.

1. При доступной нулевой точке нагрузки измерение производится однофазным ваттметром (рис. 8-19).

В последовательной цепи ваттметра идет ток  $I_\phi$  фазы  $A$ , параллельная цепь ваттметра находится под фазным напряжением  $U_\phi$  той же фазы, следовательно, ваттметр измеряет активную мощность фазы  $A$ :

$$P_W = P_\phi = I_\phi U_\phi \cos \varphi. \quad (8-16)$$

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3P_\phi = 3P_W = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi. \quad (8-17)$$

2. При недоступной нулевой точке или при приемниках, соединенных треугольником, ваттметр включается с искусственной нулевой точкой (рис. 8-20).

Искусственная нулевая точка имеет два резистора  $r_1$  и  $r_2$ , сопротивление каждого из которых равно сопротивлению параллельной цепи ваттметра, т. е.  $r_1 = r_2 = r_U$ . При этом условии параллельная цепь ваттметра и два резистора

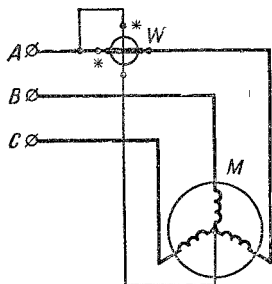


Рис. 8-19. Схема соединения ваттметра для измерения мощности трехфазной цепи при равномерной нагрузке и доступной нулевой точке.

стора образуют искусственную нулевую точку, на каждом из сопротивлений которой будет фазное напряжение.

При соединении по схеме на рис. 8-20 на параллельной цепи ваттметра будет фазное напряжение  $U_\phi = U_A$  фазы  $A$ , а в токовой цепи ваттметра — фазный ток  $I_\phi = I_A$  той же фазы. При этом ваттметр измерит активную мощность одной фазы, т. е.  $P_W = P_\phi$ , а активная мощность трехфазной цепи

$$P = 3P_W = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi. \quad (8-18)$$

Рис. 8-20. Схема соединения ваттметра с искусственной нулевой точкой для измерения мощности трехфазной цепи при равномерной нагрузке.

Ваттметр, предназначенный для постоянной совместной работы с определенной искусственной нулевой точкой, имеет шкалу, на которой наносятся значения мощности трехфазной цепи.

3. Если нагрузка равномерная, а приемники энергии соединены треугольником, то мощность трехфазной цепи можно измерить, применяя схему, указанную на рис. 8-21.

В последовательной цепи ваттметра проходит ток  $I_\phi$  фазы  $A$ , параллельная цепь ваттметра находится под фазным напряжением  $U_\phi$  той же фазы, следовательно, ваттметр измерит активную мощность одной фазы  $A$ , определяемую формулой (8-16). Активная мощность  $P$  трехфазной цепи определится известным выражением (8-17) или (8-18).

4. Для измерения мощности при равномерной нагрузке и приемниках энергии, соединенных звездой или

Таким образом, постоянная ваттметра с искусственной нулевой точкой будет в 3 раза больше постоянной того же ваттметра при использовании его в однофазной цепи.

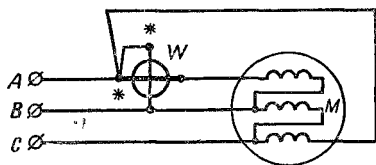


Рис. 8-21. Схема соединения ваттметра для измерения мощности трехфазной цепи при соединении приемников энергии треугольником и равномерной нагрузке фаз.

треугольником, можно применить схему, указанную на рис. 8-22.

В последовательной цепи ваттметра проходит линейный ток  $I_A = I_L$ . Параллельная цепь ваттметра при первом положении переключателя находится под линейным напряжением  $U_{AC} = U_L$ , а при втором положении переключателя — под линейным напряжением  $U_{AB} = U_L$ .

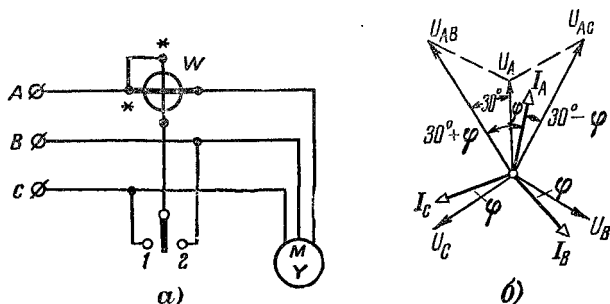


Рис. 8-22. Изменение мощности в трехфазной цепи при равномерной нагрузке фаз ваттметром с переключением (1 и 2) параллельной цепи ваттметра.

а — схема соединения; б — векторная диаграмма.

Мощность измеряемая ваттметром в первом случае

$$P'_W = I_A U_{AC} \cos(30^\circ - \varphi) = I_L U_L \cos(30^\circ - \varphi),$$

а во втором случае

$$P''_W = I_A U_{AB} \cos(30^\circ + \varphi) = I_L U_L \cos(30^\circ + \varphi).$$

Сумма показаний ваттметров равна активной мощности цепи:

$$\begin{aligned} P &= P'_W + P''_W = I_L U_L \cos(30^\circ - \varphi) + I_L U_L \cos(30^\circ + \varphi) = \\ &= I_L U_L [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= I_L U_L \cdot 2 \cos \frac{(30^\circ + \varphi) + (30^\circ - \varphi)}{2} \cos \frac{(30^\circ + \varphi) - (30^\circ - \varphi)}{2} = \\ &= I_L U_L \cdot 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi. \end{aligned}$$

а) *Измерение мощности в трехпроводных цепях при неравномерной нагрузке фаз*

Измерение мощности в трехфазных цепях при неравномерной нагрузке производится двумя одноэлементными ваттметрами или одним двухэлементным.

Мгновенная мощность трехфазной цепи может быть выражена как сумма мощностей отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C. \quad (8-19)$$

Для нулевой точки приемников энергии, соединенных звездой (рис. 8-23), по первому закону Кирхгофа

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

откуда каждый из линейных токов можно выразить через два других:

$$i_A = -i_B - i_C; \quad i_B = -i_A - i_C; \quad i_C = -i_A - i_B. \quad (8-20)$$

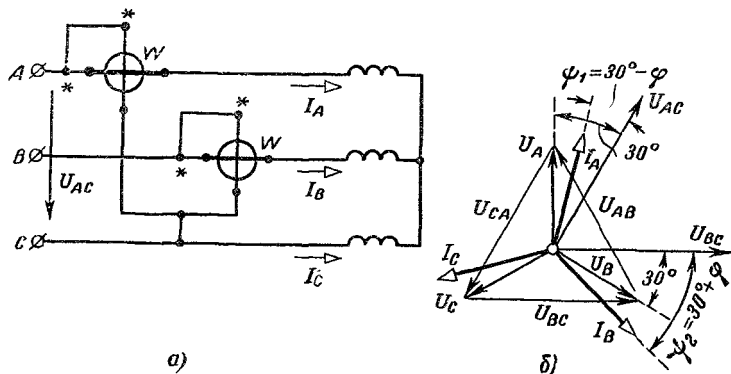


Рис. 8-23. Измерение мощности в трехфазной цепи.

*a* — схема соединения двух одноэлементных ваттметров или одного двухэлементного; *b* — векторная диаграмма.

Подставив одно из этих выражений, например для тока  $i_C$ , в формулу (8-19), получим:

$$p = i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C = i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C) = i_A u_{AC} + i_B u_{BC} = p' + p''. \quad (8-21)$$

Следовательно, мгновенную мощность трехфазной цепи можно представить суммой двух слагающих, первая из которых  $p' = i_A u_{AC}$  и вторая  $p'' = i_B u_{BC}$ .

Переходя от мгновенной мощности к средней (активной) и допуская, что токи и напряжения синусоидальны, получаем:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_A u_{AC} dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_B u_{BC} dt = I_A U_{AC} \cos \psi_1 + I_B U_{BC} \cos \psi_2 = P' + P'', \quad (8-22)$$



где  $\psi_1$  — угол сдвига фаз между током  $I_A$  и линейным напряжением  $U_{AC}$ ;

$\psi_2$  — между током  $I_B$  и напряжением  $U_{BC}$ .

Первое слагаемое  $P'$  можно измерить одним ваттметром, а второе слагаемое  $P''$  — вторым, если ваттметры соединены следующим образом: токовая цепь первого ваттметра в соответствии с индексом  $A$  у тока  $I_A$  включается в расщепку провода  $A$ , и так как ток положителен, то генераторный зажим ее соединяется с источником питания (рис. 8-23). Генераторный зажим параллельной цепи в соответствии с первой частью индекса  $A$  у напряжения  $U_{AC}$  соединен с проводом  $A$ , а негенераторный зажим той же цепи в соответствии со второй частью индекса  $C$  присоединен к проводу  $C$ . Аналогично включается второй ваттметр (рис. 8-23). Активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров.

В частном случае при симметричной системе напряжений и одинаковой нагрузке фаз (рис. 8-23, б)  $\psi_1 = 30^\circ - \varphi$  и  $\psi_2 = 30^\circ + \varphi$  показания ваттметров будут:

$$P' = IU \cos(30^\circ - \varphi) \quad \text{и} \quad P'' = IU \cos(30^\circ + \varphi).$$

При активной нагрузке ( $\varphi = 0$ ) показания ваттметров будут одинаковы, так как

$$P' = P'' = IU \cos 30^\circ.$$

При нагрузке с углом сдвига  $60^\circ$  показания второго ваттметра равны нулю, так как

$$P'' = IU \cos(30^\circ + \varphi) = IU \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0,$$

и, следовательно, мощность трехфазной цепи измеряется одним ваттметром.

При нагрузке с углом сдвига  $\varphi > 60^\circ$  мощность, измеряемая вторым ваттметром, будет отрицательной, так как  $(30^\circ + \varphi) > 90^\circ$ , а косинусы углов, больших  $90^\circ$ , отрицательны. Следовательно, подвижная часть ваттметров повернется в обратную сторону, где делений нет. Поэтому для отсчета необходимо изменить на  $180^\circ$  фазу тока в одной из цепей ваттметра. В этом случае мощность цепи трехфазного тока равна разности показаний ваттметров, так как

$$P = P' + (-P'') = P' - P'',$$

При равномерной нагрузке фаз реактивная мощность трехфазной цепи равна алгебраической разности показаний ваттметров, умноженной на  $\sqrt{3}$ :

$$\begin{aligned} \sqrt{3}(P' - P'') &= \sqrt{3}[IU \cos(30^\circ - \varphi) - IU \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \sqrt{3}IU (\cos 30^\circ \cos \varphi + \sin 30^\circ \sin \varphi - \cos 30^\circ \cos \varphi + \\ &+ \sin 30^\circ \sin \varphi) = \sqrt{3}IU \cdot 2 \sin 30^\circ \sin \varphi = \sqrt{3}IU \sin \varphi = Q. \end{aligned} \quad (8-23)$$

Так как по (8-22) активная мощность трехфазной цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров, т. е.

$$P' + P'' = P = \sqrt{3}IU \cos \varphi,$$

а также учитывая выражение для реактивной мощности

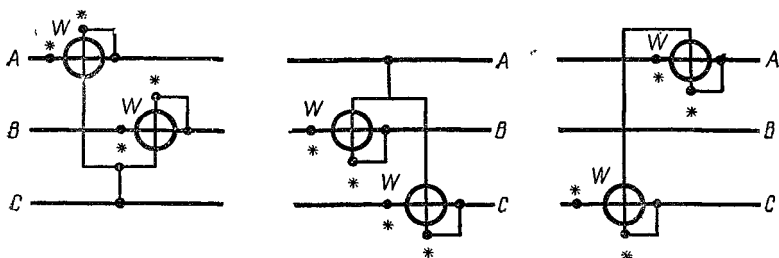


Рис. 8-24. Три схемы включения двухэлементного ваттметра.

(8-23), имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{\sqrt{3}(P' - P'')}{P' + P''} = \frac{\sqrt{3}IU \sin \varphi}{\sqrt{3}IU \cos \varphi}. \quad (8-24)$$

Активную мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами и в том случае, когда приемники энергии соединены треугольником, так как всякий треугольник можно заменить эквивалентной звездой.

Три возможные схемы включения ваттметров в трехфазную цепь даны на рис. 8-24. Правильность первой из них доказана выводом формул (8-21) и (8-22). Правильность двух других схем можно доказать аналогичным путем, заменив в (8-19) токи  $i_A$  и  $i_B$ .

В стационарных установках обычно пользуются более удобными в эксплуатации двухэлементными ваттметрами. В электродинамическом и ферродинамическом ваттметрах каждый элемент состоит из неподвижной катушки тока и

подвижной катушки напряжения. В большинстве случаев подвижные катушки крепятся на одной оси (рис. 2-18). Суммарный вращающий момент, действующий на эту ось, пропорциональный мощности трехфазной цепи, вызывает поворот подвижной части на угол, пропорциональный этой мощности.

Отечественная промышленность выпускает большое число двухэлементных ваттметров преимущественно ферродинамической системы, например ваттметр типа Д-341/2 класса точности 1,5, номинальный ток 5 А, номинальное напряжение 127—220—380 В.

### 8-6. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

#### а) Измерение мощности в четырехпроводных цепях

Реактивную мощность в трехфазных четырехпроводных цепях можно измерить одним трехэлементным ваттметром активной мощности или тремя одноэлементными. Мощность, измеряемая одноэлементным ваттметром активной мощности, определяется током  $I$  в его последовательной цепи, напряжением  $U$ , приложенным к его параллельной цепи, и косинусом угла сдвига фаз между током  $I$  и напряжением  $U$ .

Если между током  $I$  и напряжением  $U'$  будет угол сдвига  $90^\circ - \varphi$  (рис. 8-25), то измеряемая ваттметром мощность будет реактивной:

$$IU' \cos(90^\circ - \varphi) = IU' \sin \varphi = Q.$$

В трехфазных цепях при симметричной системе напряжения (рис. 8-26, б) линейные напряжения  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ,  $U_{AB}$  отстают от соответствующих фазных напряжений  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$  на углы  $90^\circ$ . Поэтому при включении последовательной цепи ваттметра на ток  $I_A$  и подведении к параллельной цепи его напряжения  $U_{BC}$  ваттметр измерит мощность

$$I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = I_A \sqrt{3} U_A \sin \varphi = \sqrt{3} Q_A, \quad (8-25)$$

т. е. в  $\sqrt{3}$  раз большую реактивной мощности фазы  $A$ .

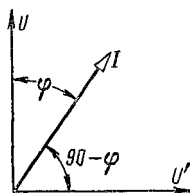


Рис. 8-25. Векторная диаграмма ваттметра активной мощности, включенного для измерения реактивной мощности.

Появление множителя  $\sqrt{3}$  объясняется тем, что приложенное к параллельной цепи ваттметра линейное напряжение  $U_{BC}$  больше фазного  $U_A$  в  $\sqrt{3}$  раз.

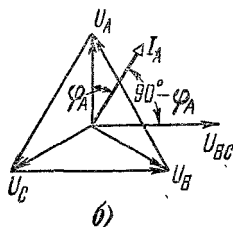
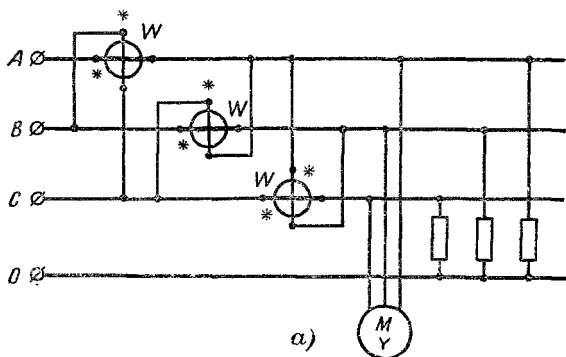


Рис. 8-26. Включение ваттметра активной мощности для измерения реактивной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи.

Если второй и третий ваттметры (или элементы трехфазного ваттметра) будут включены аналогичным образом (рис. 8-26, а), то сумма показаний трех ваттметров, деленная на  $\sqrt{3}$ , будет равна реактивной мощности трехфазной четырехпроводной цепи.

### б) Измерение мощности в трехпроводной трехфазной цепи

1. Симметричная система напряжений и равномерная нагрузка. Реактивная мощность определяется по (8-23) умножением на  $\sqrt{3}$  алгебраической разности показаний двух ваттметров, включенных по схеме рис. 8-24. В этом случае реактивную мощность можно также измерить двухэлементным ваттметром или двумя одноэлементными ваттметрами актив-

ной мощности (рис. 8-27). При этом мощность, измеряемая двухэлементным ваттметром,

$$P_W = I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) + I_B U_{CA} \cos(90^\circ - \varphi) = 2I_L U_L \sin \varphi.$$

Умножив показание ваттметра на  $\sqrt{3}/2$ , получим

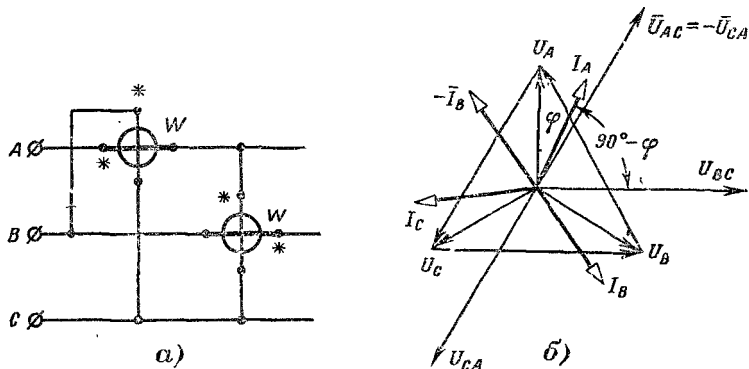


Рис. 8-27. Включение двух ваттметров для измерения реактивной мощности в трехфазной цепи.

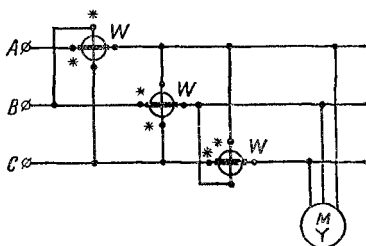
а — схема; б — векторная диаграмма.

реактивную мощность трехфазной цепи:

$$(\sqrt{3}/2) P_W = (\sqrt{3}/2) \cdot 2I_L U_L \sin \varphi = \sqrt{3} I_L U_L \sin \varphi.$$

Если двухэлементный ваттметр предназначен для измерения реактивной мощности, то на его шкале наносятся значения реактивной мощности.

Рис. 8-28. Схема включения ваттметров активной мощности для измерения реактивной мощности в трехпроводной трехфазной цепи.



2. Симметричная система напряжений и неравномерная нагрузка. Мощность можно измерить трехэлементным ваттметром или тремя одноэлементными ваттметрами активной мощности. Схема включения их та же, что и для четырехпроводной цепи (рис. 8-28).

Реактивная мощность цепи определяется показанием трехэлементного ваттметра, деленным на  $\sqrt{3}$ . При равномерной нагрузке фаз достаточно одного одноэлементного ваттметра (рис. 8-28), так как, умножив его показание на  $\sqrt{3}$ , получим:

$$\begin{aligned} \sqrt{3}P_W &= \sqrt{3}I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi = \\ &= 3I_\phi U_\phi \sin \varphi = Q. \end{aligned}$$

В этом режиме цепи измерение реактивной мощности возможно также двумя ваттметрами активной мощности

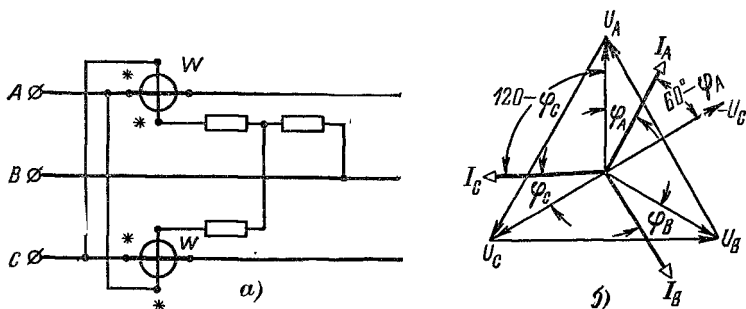


Рис. 8-29. Измерение реактивной мощности в трехфазной цепи двумя ваттметрами активной мощности.

*a* — схема; *б* — векторная диаграмма.

или одним двухэлементным ваттметром (рис. 8-29). Две параллельные цепи ваттметров и добавочный резистор образуют равномерную звезду. На параллельной цепи первого ваттметра будет фазное напряжение  $U_C$ , а на соответствующей цепи второго  $U_A$  (рис. 8-29, б).

Сумма показаний двух ваттметров

$$\begin{aligned} P_W &= P_{W1} + P_{W2} = I_A U_C \cos(60^\circ - \varphi) + I_C U_A \cos(120^\circ - \varphi) = \\ &= I_\phi U_\phi \left( \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \\ &= \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\phi. \end{aligned}$$

Умножив показания на  $\sqrt{3}$ , получим реактивную мощность трехфазной цепи:

$$\sqrt{3} P_W = 3Q_\phi.$$

## 8-7. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В трехфазных цепях низкого напряжения, если токи цепи превышают номинальные токи измерительных приборов, последние включаются через трансформаторы тока. В высоковольтных цепях трехфазного тока измерительные приборы включаются через трансформаторы тока и напряжения. На шкалах ваттметров, предназначенных для постоянной совместной работы с измерительными трансформаторами, наносятся значения мощности в первичной цепи. У ваттметров, не предназначенных для такой совместной работы, на шкалах даются значения, определяемые мощностями, непосредственно действующими на цепи ваттметров. Поэтому для определения мощности первичной цепи показания таких ваттметров необходимо умножить на номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, совместно с которыми ваттметр включен.

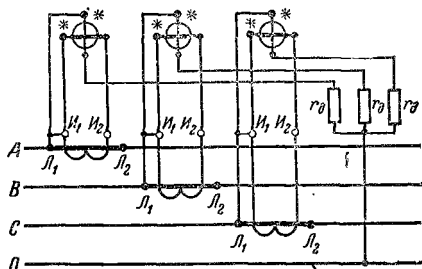


Рис. 8-30. Схема соединения трехэлементного ваттметра с трансформаторами тока.

Поэтому для определения мощности первичной цепи показания таких ваттметров необходимо умножить на номинальные коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов, совместно с которыми ваттметр включен.

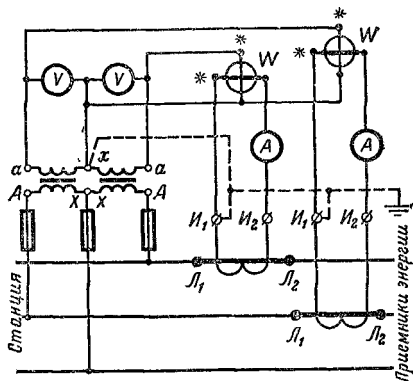


Рис. 8-31. Схема соединения двухэлементного ваттметра с измерительными трансформаторами для измерения мощности в высоковольтной цепи трехфазного тока.

Рассмотрим некоторые наиболее распространенные схемы.

1. Схема соединений трехэлементного ваттметра с трансформаторами тока дана на рис. 8-30. Первичная мощность  $P_1$  определяется показанием ваттметра и номиналь-

ным коэффициентом трансформации  $k_{HI}$  трансформатора тока, т. е.

$$P_1 = P_W k_{HI}.$$

2. Схема соединения двухэлементного ваттметра с измерительными трансформаторами тока и напряжения показана на рис. 8-31. Первичная мощность определяется по формуле

$$P_1 = P_W k_{HI} k_{HU}.$$

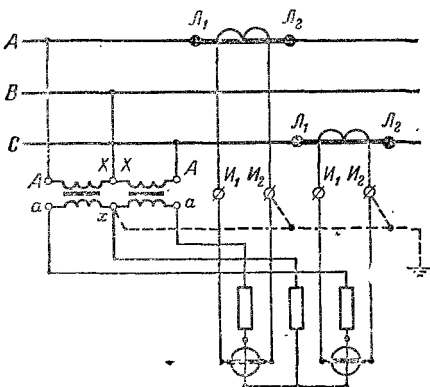


Рис. 8-32. Схема соединения ваттметра типа Д-341/1.

3. Схема соединения ферродинамического ваттметра реактивной мощности (варметра) типа Д-341/1 с трансформаторами тока и напряжения дана на рис. 8-32. На шкале варметра даны значения реактивности мощности первичной цепи.

**Пример 8-1.** Двухэлементный ваттметр с номинальным напряжением  $U_H = 100$  В, номинальным током  $I_H = 5$  А включен в цепь (рис. 8-31). Номинальный коэффициент трансформации каждого из трансформаторов тока  $k_{HI} = 100/5 = 20$ . Номинальный коэффициент трансформации каждого из трансформаторов напряжения  $k_{HU} = = 6\,000/100 = 60$ .

Определить мощность первичной цепи, если ваттметр показывает 300 Вт.

**Решение.**  $P_1 = P_W k_{HI} k_{HU} = 300 \cdot 20 \cdot 60 = 360\,000$  Вт = = 360 кВт.

## Глава девятая

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

#### 9-1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Электрические счетчики — это интегрирующие приборы для измерения электрической энергии и количества электричества.



Наибольшее распространение получили счетчики электрической энергии индукционной системы для цепей переменного тока; электродинамические и ферродинамические для цепей постоянного тока; магнитоэлектрические и электролитические постоянного тока для измерения количества электричества.

Счетчик отличается от показывающего прибора тем, что вследствие отсутствия пружины подвижная часть его вращается, причем каждому обороту ее соответствует определенное значение измеряемой величины.

Регистрация измеряемой величины производится счетным механизмом, представляющим по существу счетчик оборотов.

## 9-2. ИНДУКЦИОННЫЙ ОДНОФАЗНЫЙ СЧЕТЧИК АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

Устройство и соединение индукционного счетчика типа СО-2 показаны на рис. 9-1. Он состоит из последовательного *A* и параллельного *B* электромагнитов, алюминиевого диска *D*, укрепленного на оси, тормозного магнита *M* и счетного механизма.

При работе счетчика по его последовательной обмотке проходит ток *I* и в сердечнике электромагнита возникает магнитный поток  $\Phi_I$ .

Напряжение *U* вызывает в обмотке параллельного электромагнита ток  $I_U$ , и в сердечнике возникает магнитный поток  $\Phi_U$ , состоящий из рабочего  $\Phi_{U_p}$  и вспомогательного  $\Phi_{U_b}$  (рис. 9-1). Поток  $\Phi_I$  и  $\Phi_{U_p}$ , пронизывая диск, индуцируют в нем вихревые токи. Вращающий момент, возникающий в результате взаимодействия вихревых токов с магнитными потоками [см. (2-21)],

$$M = kf\Phi_{mI}\Phi_{mU} \sin \psi. \quad (9-1)$$

Если сердечник последовательного электромагнита находится в ненасыщенном состоянии, то  $\Phi_{mI} \equiv I$ . Если частота *f* постоянна, то  $\Phi_{mU} \equiv U$ , так как  $\Phi_U \approx U/4,44fw$ . Наконец, если  $\sin \psi = \cos \varphi$ , что возможно при  $\psi = 90^\circ - \varphi$ , так как  $\sin(90^\circ - \varphi) = \cos \varphi$ , то вращающий момент по (9-1) может быть выражен:

$$M = k_1IU \cos \varphi = k_1P, \quad (9-2)$$

т. е. он будет пропорционален мощности цепи.

Магнитный поток  $\Phi_I$  вследствие потерь в стали отстает от возбуждающего его тока  $I$  на угол  $\alpha_I$  (рис. 9-2). Ток  $I_U$  из-за индуктивности параллельной катушки отстает по фазе от напряжения  $U$  на угол, близкий к  $90^\circ$ . Из вектор-

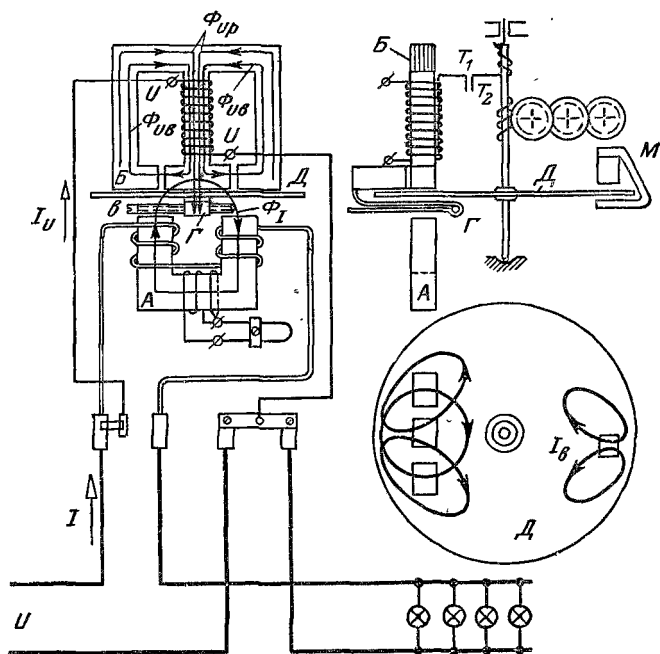


Рис. 9-1. Схема устройства и соединения индукционного счетчика.

ной диаграммы (рис. 9-2) угол между напряжением и параллельным рабочим потоком  $\Phi_{U\beta}$

$$\beta = \varphi + \alpha_I + \psi.$$

Подставив значение  $\psi = 90^\circ - \varphi$ , получим:

$$\beta = \varphi + \alpha_I + 90^\circ - \varphi = 90^\circ + \alpha_I.$$

Параллельный рабочий магнитный поток  $\Phi_{U\beta}$  проходит через средний стержень электромагнита, диск и противоположный  $\Gamma$ , расположенный под диском. Вследствие больших потерь на пути этого потока и, в частности, в диске он сдвинут по фазе от тока  $I_U$  на угол, бóльший, чем потоки

$\Phi_U$  и  $\Phi_{UB}$ , последний из которых замыкается через средний и боковые стержни электромагнита, помимо диска.

Таким путем можно получить угол  $\beta \geq 90^\circ + \alpha_I$ . Подгонка угла  $\beta$  до значения  $90^\circ + \alpha_I$  производится изменением угла  $\beta$  или  $\alpha_I$ .

В счетчиках (рис. 9-1) на сердечник последовательного электромагнита накладывают короткозамкнутые витки и обмотку, замкнутую на проволочный резистор. Токи, индуцируемые в обмотке и витках, увеличивают потери на пути потока  $\Phi_I$ , а следовательно, увеличивают  $\alpha_I$ . Угол  $\alpha_I$  регулируют проволочным резистором до получения вращающего момента, пропорционального измеряемой мощности (9-2).

При движении диска счетчика возникает тормозной момент  $M_T$ , действующий на диск. Он создается взаимодействием потока  $\Phi_T$  тормозного магнита (рис. 9-1) с вихревыми токами  $I_B$ , индуцированными в диске при его движении в том же потоке  $\Phi_T$ .

Тормозной момент

$$M_T = k' I_B \Phi_T.$$

Вихревые токи  $I_B$  при постоянном сопротивлении  $r_d$  диска пропорциональны э. д. с., индуцированной в диске ( $I_B = E_d/r_d$ ), а э. д. с. пропорциональна потоку  $\Phi_T$  и частоте вращения диска, т. е. числу оборотов диска в секунду ( $n$ ). Таким образом,

$$M_T = k' I_B \Phi_T = k' \frac{E_B}{r_d} \Phi_T = k' \frac{k'' \Phi_T n}{r_d} \Phi_T = k''' n \Phi_T^2,$$

где  $k'''$  — постоянный коэффициент пропорциональности.

При постоянном потоке  $\Phi_T$  тормозного магнита

$$M_T = k_2 n.$$

Кроме этого основного тормозного момента, в счетчике создаются еще два: 1) тормозной момент  $M_{TUP}$  от взаимодействия потока  $\Phi_{UP}$  с вихревыми токами, индуцированными в диске при его вращении потоком  $\Phi_{UP}$ ; 2) тормозной момент  $M_{TI}$  от взаимодействия потока  $\Phi_I$  с вихревыми токами, индуцированными в диске при его вращении потоком  $\Phi_I$ .

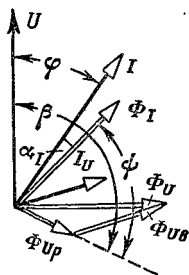


Рис. 9-2. Векторная диаграмма счетчика.

Для того чтобы тормозной момент  $M_{TI}$ , созданный последовательным потоком  $\Phi_I$ , в меньшей степени влиял на результирующий тормозной момент, поток  $\Phi_I$  берут малым по сравнению с  $\Phi_T$ .

Параллельный рабочий поток  $\Phi_{Ur}$  мало изменяется при нормальной работе счетчика, поэтому тормозной момент  $M_{Tur}$ , созданный этим потоком, можно рассматривать как дополнительный к основному тормозному моменту  $M_T$ , что и учитывается при регулировке счетчика.

При неизменной мощности в измеряемой цепи устанавливается постоянная частота вращения диска счетчика, при которой

$$M = M_T \quad \text{или} \quad k_1 P = k_2 n,$$

откуда

$$P = (k_2/k_1) n = kn,$$

т. е. частота вращения диска пропорциональна мощности  $P$  цепи, а энергия, израсходованная за время  $t$ ,

$$W = Pt = knt = kN,$$

т. е. число оборотов диска счетчика  $N$  за то же время  $t$  будет пропорционально израсходованной энергии. Следовательно, израсходованную энергию можно измерить числом оборотов диска счетчика  $N$ .

Коэффициент пропорциональности  $k = W/N$ , числом, равным энергии, израсходованной в сети за время одного оборота диска счетчика, называется действительной постоянной счетчика.

Червячная передача и шестеренки (рис. 9-3) передают движение диска счетчика пяти роликам («барabanчикам»), на цилиндрических поверхностях которых расположены цифры от 0 до 9. Барabanчики свободно надеты на ось. Первый барabanчик (рис. 9-3 правый), скрепленный с шестеренкой, при движении диска непрерывно вращается. Один оборот его вызывает поворот второго на  $1/10$  часть оборота. Полный оборот второго барabanчика вызывает поворот третьего на  $1/10$  часть оборота и т. д. Барabanчики прикрыты щитком с отверстиями, через которые видно только по одной цифре на каждом барabanчике. Прочитанное через отверстия в щитке число дает значение энергии, зарегистрированной счетчиком за период его работы с момента нулевого показания. Энергия, израсходованная за определенный промежуток времени, находится как разность показаний счетчика в конце и начале этого промежутка.

Число оборотов диска счетчика, соответствующее единице энергии, регистрируемой счетчиком, называется передаточным числом. Оно дается на щитке счетчика, например 1 кВт·ч равен 1 000 оборотов. Величина, обратная передаточному числу, т. е. энергия, регистрируемая счетчиком за один оборот его диска, носит название номинальной постоянной счетчика  $k_H$ .

Разность между энергией, зарегистрированной счетчиком  $W' = k_H N$ , и действительной энергией, израсходован-

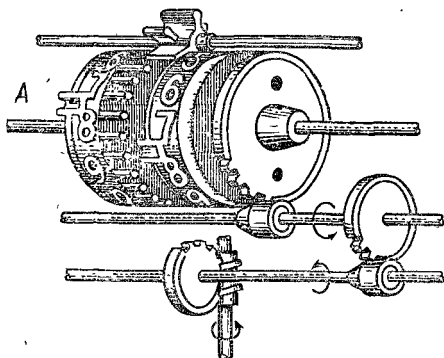


Рис. 9-3. Схема устройства счетного механизма.

ной за то же время в цепи  $W = kN$ , представляет собой абсолютную погрешность счетчика, т. е.

$$\Delta W = W' - W.$$

Относительная погрешность счетчика

$$\gamma_W = \frac{W' - W}{W} \cdot 100\% = \frac{k_H N - kN}{kN} \cdot 100\% = \frac{k_H - k}{k} \cdot 100\% = \gamma_k,$$

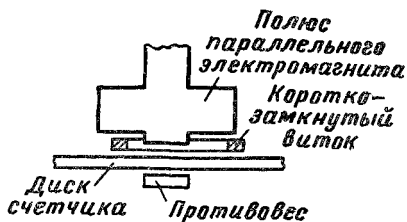
т. е. погрешность счетчика равна погрешности его постоянной.

При работе счетчика возникает момент трения и погрешность от трения, значительная при малых нагрузках. Поэтому момент трения компенсируют (при нагрузке 10% номинальной) добавочным вращающим моментом.

В счетчиках (рис. 9-1) в противопололюс параллельного электромагнита ввертывают стальной винт  $b$ . Через этот винт от потока  $\Phi_{лр}$  отделяется небольшая часть его  $\Phi_{вр}$ , которая из-за потерь в винте отстает по фазе от остальной

части потока  $\Phi'_{Ур}$ . Разделение потока  $\Phi_{Ур}$  на две части приводит к получению добавочного момента, компенсирующего трение.

В счетчиках типа СО-2 компенсирующий момент получают при помощи короткозамкнутого витка, расположенного под полюсом параллельного электромагнита (рис. 9-4).



При асимметричном расположении витка магнитное поле его, воздействуя на поток  $\Phi_{Ур}$ , вызывает разделение его на две части  $\Phi'_{Ур}$  и  $\Phi''_{Ур}$ , сдвинутые по фазе, вследствие чего, как и в предыдущем случае, возникает компенсирующий момент.

Рис. 9-4. Схема устройства для создания момента, компенсирующего трение в счетчиках типа СО-1, СО-2 и СО-5.

Если компенсирующий момент превышает момент трения, то диск счетчика может вращаться при наличии напряжения на параллельной цепи и отсутствии нагруз-

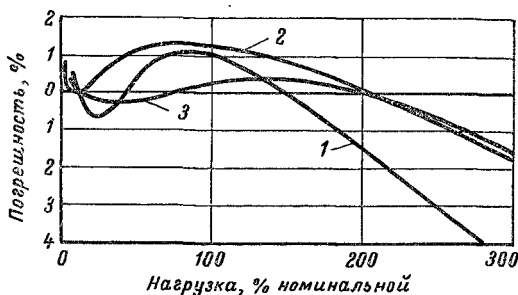


Рис. 9-5. Кривые погрешностей счетчиков, 1 — СО-1; 2 — СО-2; 3 — СО-0М и СО-5.

ки — холостой ход или самоход счетчика. Он может возникнуть от неправильной регулировки счетчика, повышения напряжения, вибрации опоры, на которой он крепится, и т. п.

Для устранения самохода на сердечнике параллельного электромагнита укрепляют стальную пластину — флажок  $T_1$  (рис. 9-1), а на оси счетчика — стальную про-

волоку — крючок  $T_2$ . При сближении крючка с флажком они притягиваются с силой, достаточной для прекращения самохода.

Наименьшая нагрузка, выраженная в процентах номинальной, при которой диск счетчика начинает вращаться без остановки, называется чувствительностью (порогом чувствительности)

$$S = (P_{\text{наим}}/P_{\text{ном}}) \cdot 100\%.$$

На рис. 9-5 даны кривые погрешностей некоторых наиболее широко распространенных отечественных счетчиков СО-1; СО-2; СО-5 и др., устройство которых мало отличается от рассмотренного выше счетчика.

Изгиб кривых при малой нагрузке объясняется влиянием трения; при 10%-ной нагрузке момент трения компенсирован; изгиб кривых при перегрузке объясняется торможением от магнитного потока  $\Phi_I$ .

Погрешности счетчика зависят также от температуры, частоты переменного тока и других факторов. Допустимые погрешности для однофазных счетчиков согласно ГОСТ 6570-60 даны в табл. 9-1.

Т а б л и ц а 9-1

Нагрузка, % номинальной	Допустимые погрешности, %			
	Класс 1	Класс 2	Класс 2,5	
5	$\pm 2$	$\pm 2,5$	—	$\cos \varphi = 1$
10	$\pm 1$	$\pm 2,0$	$\pm 3,5$	
От 10 до 150	$\pm 1$	—	—	
От 10 до 200	—	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
10	$\pm 2$	$\pm 2,5$	—	$\cos \varphi = 0,5$
От 20 до 150	$\pm 1$	$\pm 2,0$	$\pm 4$	

Счетчик должен удовлетворять следующим требованиям:

1. При прохождении тока только по параллельной цепи диск счетчика, сделав после включения не более одного оборота, должен оставаться неподвижным при напряжениях 80—110% номинального.

2. Счетчик должен вращаться без остановки при номинальных напряжении, частоте и  $\cos \varphi = 1$  при нагрузке 0,5% номинальной для счетчиков класса 1 и 2 и 1% номинальной для счетчиков остальных классов.

### 9-3. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕЯХ

Электрическая энергия в четырехпроводных трехфазных цепях измеряется трехэлементным счетчиком, например СА4-И672 (рис. 9-6), схема включения которого та же, что и соответствующего ваттметра (рис. 8-18). Счетчик имеет три электромагнитные системы, воздействующие на три диска, укрепленные на одной оси,

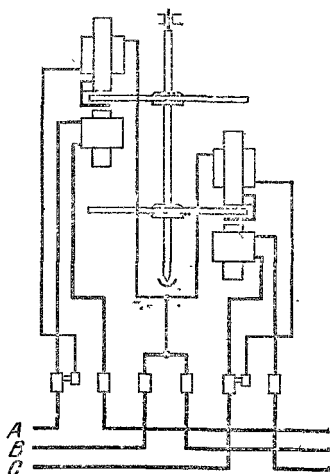
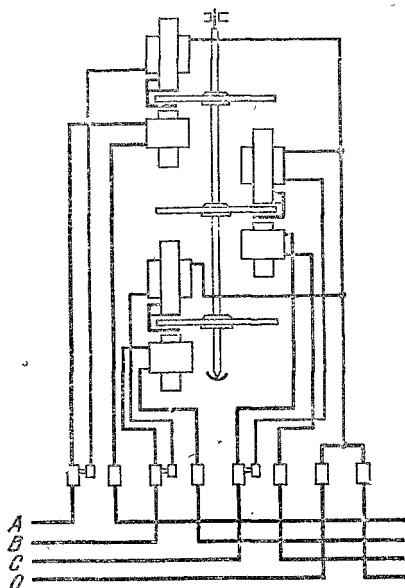


Рис. 9-6. Схема устройства и соединения трехэлементного трехдискового счетчика типа СА4-И672.

Рис. 9-7. Схема устройства и соединения двухэлементного двухдискового счетчика типа СА3-И670.

движение которой передается счетному механизму. Устройство каждой из электромагнитных систем то же, что и у однофазного счетчика (рис. 9-1).

В трехпроводных цепях трехфазного тока электрическая энергия измеряется двухэлементными счетчиками,



например счетчиком типа САЗ-И670 (рис. 9-7), схема включения которого та же, что и двухэлементного ваттметра. Две электромагнитные системы счетчика воздействуют на два алюминиевых диска, укрепленных на одной оси.

Погрешности двухэлементного двухдискового счетчика не зависят от неравномерности нагрузки фаз, несимметрии напряжения и последовательности фаз, так как исключено влияние одного элемента на другой. Иногда вместо двухэлементных счетчиков применяют два однофазных счетчика (парные счетчики).

При измерении энергии парными счетчиками при фазном угле сдвига, большем  $60^\circ$ , один из счетчиков будет вращаться в обратную сторону вследствие отрицательного значения вращающего момента (см. § 8-5, в); из-за этого будет дополнительная погрешность, так как момент, компенсирующий трение, при перемене направления вращения диска сохраняет свой знак и будет вызывать дополнительное торможение диска.

#### 9-4. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Реактивную энергию в четырехпроводной трехфазной цепи можно измерить трехэлементным счетчиком реактивной энергии, например СР4-И673, устройство которого такое же, как и счетчика СА4-И672. Схема счетчика (рис. 9-8) аналогична схеме соединения ваттметра (рис. 8-26).

Для измерения реактивной энергии в четырехпроводных цепях применяются также счетчики с дополнительной последовательной обмоткой типа СР4-ИТР (рис. 9-9). Это — двухэлементный счетчик, каждый из последовательных элементов которого имеет по две обмотки — основную и дополнительную с одинаковым числом витков.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы (рис. 9-9) и допуская, что система напряжений симметрична, напишем выражения вращающихся моментов, действующих

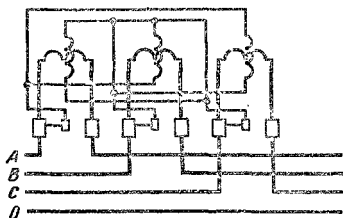


Рис. 9-8. Схема счетчика типа СР4-И673.

на подвижную часть счетчика. Первый элемент вызывает вращающий момент

$$M_1 = kU_{BC} [I_A \cos(90^\circ - \varphi_A) - I_B \cos(30^\circ + \varphi_B)] = \\ = kU_{BC} \left( I_A \sin \varphi_A - \frac{\sqrt{3}}{2} I_B \cos \varphi_B + \frac{1}{2} I_B \sin \varphi_B \right).$$

Второй элемент счетчика вызывает вращающий момент

$$M_2 = kU_{AB} [I_C \cos(90^\circ - \varphi_C) - I_B \cos(150^\circ + \varphi_B)] = \\ = kU_{AB} \left( I_C \sin \varphi_C + \frac{\sqrt{3}}{2} I_B \cos \varphi_B + \frac{1}{2} I_B \sin \varphi_B \right).$$

Вращающий момент счетчика

$$M = M_1 + M_2 = k\sqrt{3}U_\phi (I_A \sin \varphi_A + I_B \sin \varphi_B + \\ + I_C \sin \varphi_C) = k\sqrt{3}Q,$$

т. е. он пропорционален реактивной мощности, и, следовательно, счетчик может учитывать реактивную энергию.

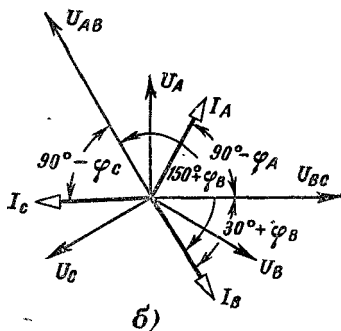
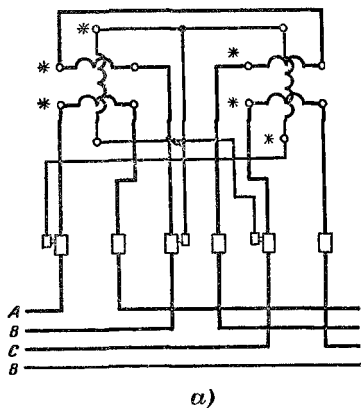


Рис. 9-9. Схема соединения (а) и векторная диаграмма (б) счетчика типа СР4-ИТР.

При симметричной системе напряжений показания счетчика не зависят от асимметрии токов. При соединении счетчика необходимо обеспечить последовательность фаз, указанную на счетчике.

Рассмотренные счетчики с дополнительными последовательными обмотками могут применяться и в трехпро-

водных цепях трехфазного тока. В трехфазных трехпроводных цепях применяются также реактивные счетчики с 60-градусным сдвигом, например типа СРЗ-И671 (рис. 9-10). Это — двухэлементные счетчики, у которых угол сдвига между напряжением на параллельной цепи каж-

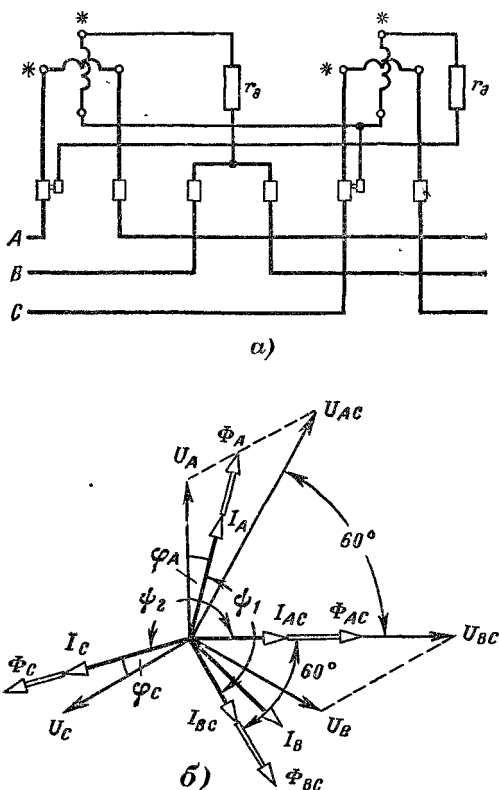


Рис. 9-10. Схема соединения (а) и векторная диаграмма (б) счетчика типа СРЗ-И671.

дого элемента и соответствующим параллельным рабочим магнитным потоком составляет  $60^\circ + \alpha_I$ .

Уменьшение угла сдвига на  $30^\circ$  по сравнению со счетчиком активной энергии (§ 9-2) достигается включением в каждую параллельную цепь счетчика добавочного резистора.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы (рис. 9-10) и пренебрегая ради простоты углами потерь в стали, напишем выражения вращающихся моментов счетчика.

Первый элемент создает вращающийся момент

$$M_1 = k_1 \Phi_{BC} \Phi_A \sin \psi_1 = \\ = k_1 \Phi_{BC} \Phi_A \sin (150^\circ - \varphi).$$

Второй элемент создает второй вращающийся момент

$$M_2 = k_1 \Phi_{AC} \Phi_C \sin \psi_2 = \\ = k_1 \Phi_{AC} \Phi_C \sin (210^\circ - \varphi).$$

При  $\Phi_A \equiv I_A$ ;  $\Phi_C \equiv I_C$ ;  $\Phi_{AC} \equiv U_{AC}$ ;  $\Phi_{BC} \equiv$

Рис. 9-11. Схема включения счетчика типа СР4-ИТР в трехпроводную трехфазную цепь.

$\equiv U_{BC}$  результирующий вращающийся момент счетчика

$$M = M_1 + M_2 = kU_{BC}I_A \sin (150^\circ - \varphi) + \\ + kU_{AC}I_C \sin (210^\circ - \varphi) = kU_{\perp}I_{\perp} [\sin (150^\circ - \varphi) + \\ + \sin (210^\circ - \varphi)] = k\sqrt{3}U_{\perp}I_{\perp} \sin \varphi,$$

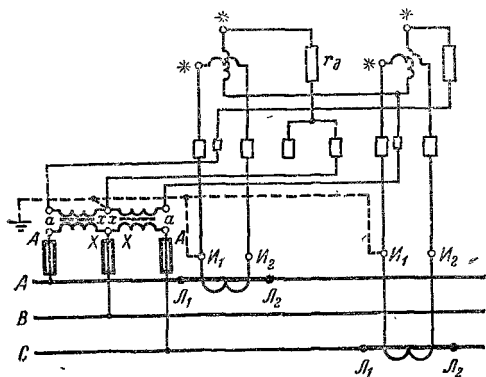


Рис. 9-12. Схема соединения счетчика типа СР3-И671 с трансформаторами тока и напряжения.

таким образом, он пропорционален реактивной мощности цепи, и, следовательно, счетчик учитывает реактивную энергию ее.

При симметричной системе напряжений асимметрия токов не вызывает дополнительной погрешности в показаниях счетчика.

Включение счетчиков в низковольтные цепи с токами, большими номинальных токов счетчиков, производится через трансформаторы токов, включение в высоковольтные цепи — через трансформаторы тока и напряжения.

Схемы соединения счетчика с дополнительными последовательными обмотками через два трансформатора тока с трехфазной трехпроводной сетью даны на рис. 9-11, а на рис. 9-12 даны схемы соединения счетчика типа СРЗ-И671 с трансформаторами тока и напряжения.

### 9-5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК

Электродинамический счетчик (рис. 9-13) состоит из неподвижной катушки тока  $ББ$ , имеющей две секции, и подвижной части, состоящей из укрепленного на оси алюминиевого диска  $Д$  и явора  $Я$ .

Последний выполнен из трех катушек  $а'$ ,  $а''$  и  $а'''$ , соединенных звездой или треугольником и присоединенных к трем пластинам коллектора. На коллектор наложены щетки, при помощи которых ток поступает в катушки явора. Якорь, добавочный резистор  $r_d$  и катушка  $k_{тр}$ , компенсирующая трение, включается на напряжение сети.

Токи неподвижной катушки и явора создают магнитные поля, потоки которых пропорциональны соответственно току и напряжению измеряемой цепи. В результате взаимодействия этих полей возникает вращающий момент, пропорциональный мощности.

Тормозной момент, созданный, как и в индукционном счетчике, тормозным магнитом  $М$ , пропорционален частоте вращения диска, а она пропорциональна мощности цепи. Таким образом, число оборотов диска за произвольный

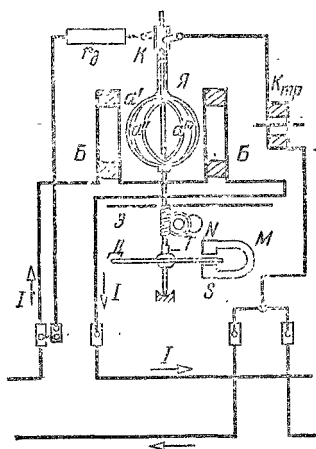


Рис. 9-13. Схема электродинамического счетчика.

промежуток времени пропорционально энергии, израсходованной в цепи. Энергия регистрируется счетным механизмом.

Для того чтобы момент трения не вносил погрешности в показания счетчика, он компенсируется добавочным моментом. Этот момент возникает в результате взаимодействия магнитного поля, созданного катушкой  $k_{тр}$  и током якоря при прохождении его по катушкам  $a'$ ,  $a''$  и  $a'''$ .

## 9-6. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК

Измерение количества электричества, израсходованного в цепи постоянного тока, производится счетчиками ампер-часов. В качестве последних применяются магнитоэлектрические и электролитические счетчики.

Магнитоэлектрический счетчик (рис. 9-14) состоит из двух постоянных магнитов, между полюсами которых расположен якорь с тремя плоскими секторообразными катушками, присоединенными к коллекторным пластинам. Взаимодействие

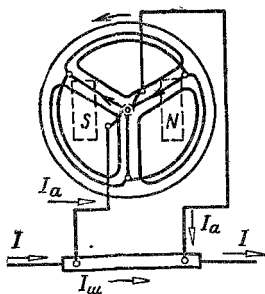


Рис. 9-14. Схема магнитоэлектрического счетчика.

тока якоря с полем магнитов вызывает вращающий момент, под действием которого якорь будет вращаться с частотой, пропорциональной току якоря и току главной цепи.

Тормозной момент создается взаимодействием полей постоянных магнитов с вихревыми токами, наведенными им в двух алюминиевых дисках, между которыми расположены катушки якоря.

Число оборотов якоря за некоторый промежуток времени пропорционально количеству электричества, протекающему по главной цепи за то же время. Счетный механизм показывает значение измеряемой величины.

## ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 10-1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАЗОМЕТРЫ

Измеряя ток, напряжение и мощность цепи переменного тока, можно коэффициент мощности ее определить по формуле

$$\cos \varphi = P/(IU).$$

Этот способ измерения не точен, имеет ряд недостатков и применяется редко.

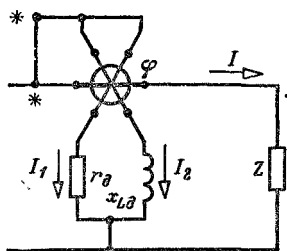


Рис. 10-1. Схема электродинамического фазометра.

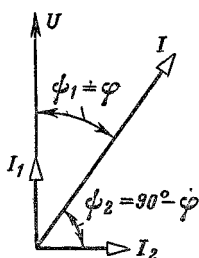


Рис. 10-2. Векторная диаграмма электродинамического фазометра.

Коэффициент мощности обычно измеряется фазометрами. Применяются электродинамические, ферродинамические и электромагнитный фазометры.

Электродинамический фазометр представляет собой логометр (§ 2-3). Неподвижная катушка его является катушкой тока (рис. 10-1). Подвижные катушки вместе с добавочными резисторами образуют две параллельные ветви цепи напряжения. В одной из этих ветвей ток  $I_1$  совпадает по фазе с напряжением, так как добавочный резистор имеет активное  $r_d$  сопротивление. В другой ветви ток  $I_2$  отстает по фазе от напряжения на  $90^\circ$  (рис. 10-2), так как добавочный резистор (рис. 10-2) имеет реактивное сопротивление  $x_{Ld}$ .

Угол поворота подвижной части логометра (2-19)

$$\alpha = F \left( \frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} \right) = F \left( \frac{I_2 \cos (90^\circ - \varphi)}{I_1 \cos \varphi} \right) = F \left( \frac{I_2}{I_1} \operatorname{tg} \varphi \right).$$

При постоянных сопротивлениях параллельных ветвей неизменно отношение токов  $I_2$  и  $I_1$ ; при этом

$$\alpha = F(k \operatorname{tg} \varphi) = F_1(\varphi), \quad (10-1)$$

т. е. угол поворота подвижной части фазометра зависит от угла  $\varphi$  сдвига фаз между током и напряжением цепи.

Шкала фазометра градуируется в единицах угла  $\varphi$  или  $\cos \varphi$ .

Показания электродинамического фазометра зависят от частоты, так как при ее изменении сопротивление резистора ( $r_d$ ) первой ветви остается неизменным, а второй ветви ( $\omega L_d$ ) изменяется. Влияние частоты уменьшают, например, в фазометре типа ЭЛФ следующим образом.

Вторая подвижная катушка фазометра (рис. 10-3) выполняется из двух одинаковых секций. Последовательно с первой секцией включается добавочная индуктивность  $\omega L_d$ , ток в ней отстает от напряжения примерно на  $1/4$  периода. Последовательно со второй секцией включен добавочный конденсатор с сопротивлением  $1/\omega_n C_d = \omega_n L_d$ , и ток в ней опережает напряжение на  $1/4$  периода. Так как две секции включены встречно и одинаковые токи находятся в противофазе, то взаимодействие их с током неподвижной катушки вызывает два вращающих момента, равных по модулю и знаку.

При изменении частоты, например при ее уменьшении, увеличение тока в первой секции ( $U/\omega L_d$ ) компенсируется уменьшением тока во второй секции ( $U\omega C_d$ ). Вследствие этого изменение частоты в известных границах не вызывает изменений показаний фазометра.

При изменении частоты, например при ее уменьшении, увеличение тока в первой секции ( $U/\omega L_d$ ) компенсируется уменьшением тока во второй секции ( $U\omega C_d$ ). Вследствие этого изменение частоты в известных границах не вызывает изменений показаний фазометра.

Фазометры ЭЛФ переносные, класса точности 1,5 с номинальными токами 5 и 10 А, с номинальными напряжениями 36 (100), 127 и 220 В, номинальной частотой 400, 500, 1 000 или 2 400 Гц. Шкала  $0,5_C - 0 - 0,5_L$ .

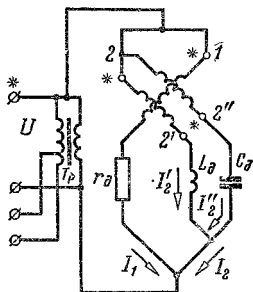


Рис. 10-3. Параллельная цепь фазометров типа ЭЛФ.



Электродинамические фазометры трехфазного тока имеют аналогичное устройство, но в двух параллельных ветвях их включены одинаковые активные добавочные резисторы  $r_d$ , так как эти ветви включаются на линейные напряжения, сдвинутые по фазе на  $60^\circ$ , например  $U_{AB}$  и  $U_{AC}$  (рис. 10-4). По этому принципу устроены электродинамические фазометры типа Д510.

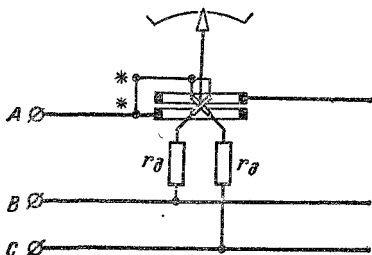


Рис. 10-4. Схема включения трехфазного электродинамического фазометра.

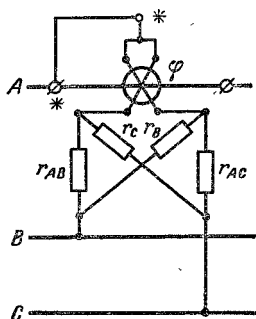


Рис. 10-5. Схема ферродинамического фазометра типа Д342.

Рассмотренные фазометры можно применять только при симметричной системе напряжений и токов. Показания их не зависят от частоты.

Схема ферродинамического трехфазного щитового фазометра типа Д342 дана на рис. 10-5. Она отличается от предыдущей двумя добавочными резисторами  $r_B$  и  $r_C$ , что позволяет уменьшить угол сдвига между напряжениями на параллельных катушках и соответственно расширить пределы измерения угла сдвига. Класс точности этого фазометра 2,5, номинальный ток 5 А, номинальные напряжения 100, 127, 220 и 380 В, шкала 0,5с—1—0,5Л.

## 10-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФАЗОМЕТР

Трехфазный фазометр типа ЭНФ имеет две неподвижные катушки тока  $A$  и  $C$  (рис. 10-6) и одну неподвижную катушку напряжения  $B$ , в цепь которой включен добавочный резистор  $r_d$ . На одной оси со стрелкой укреплен Z-образный стальной сердечник из двух лепестков, соединенных трубкой.

Катушка напряжения создает пульсирующее магнитное поле, линии которого замыкаются через лепестки

сердечника. Магнитная индукция в точках пересечения оси с плоскостью лепестков изменяется по закону синуса

$$B_U = B_m U \sin \omega t.$$

Катушки тока расположены под углом  $120^\circ$ . Токи  $I_A$  и  $I_C$  создают вращающееся поле. Вектор магнитной индукции в точках, расположенных на оси катушек, вращается с угловой скоростью  $\omega = 2\pi/T$ .

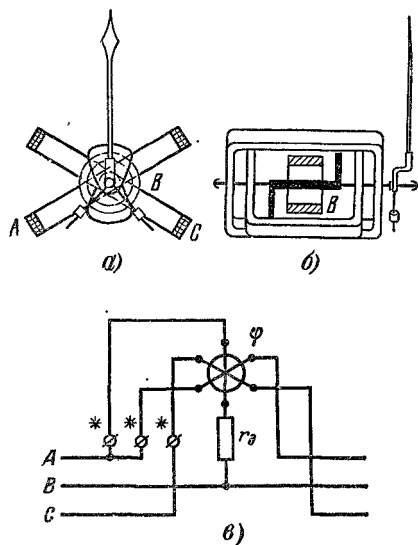


Рис. 10-6. Устройство (а, б) и схема соединения (в) электромагнитного фазометра.

Под влиянием вращающегося поля подвижный сердечник займет положение, при котором магнитная энергия поля измерительного механизма будет наибольшей. Это соответствует положению лепестков сердечника в направлении вектора индукции вращающегося поля в момент максимума индукции пульсирующего поля.

Разным фазным углам сдвига тока относительно напряжения соответствуют разные пространственные положения оси вращающегося поля в момент максимума индукции пульсирующего поля, разными будут и положения сердечника. По углу поворота подвижной части определяют фазный угол сдвига в цепи трехфазного тока.

### 10-3. ФАЗОУКАЗАТЕЛЬ

Для определения последовательности фаз трехфазной цепи применяют фазоуказатели. Один из них (типа И517) состоит из трех маленьких катушек, соединенных звездой. Над сердечниками катушек расположен алюминиевый диск, который может вращаться.

Соединение зажимов прибора с проводами сети (рис. 10-7) вызовет вращение диска, так как катушки создадут бегущее

поле, которое, пересекая диск, увлечет его в сторону вращения поля. Если диск вращается в направлении, указанном стрелкой, то последовательность присоединенных фаз соответствует последовательности расположения зажимов.

#### 10-4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЧАСТОТОМЕРЫ

Электродинамический частотомер, например переносный типа Д506 (рис. 10-8, а), представляет собой логометр (§ 2-3). Подвижная катушка  $B_1$  и конденсатор  $C_1$  образуют первую параллельную ветвь.

Подвижная катушка  $B_2$ , неподвижная катушка  $A$ , реактивная катушка  $L$ , конденсатор  $C_2$  и добавочный резистор  $r_{\text{д}}$  составляют вторую ветвь прибора. Резистор  $r_{\text{ш}}$  является подгоночным.

Индуктивность  $L$  и емкость  $C_2$  настроены в резонанс при некотором среднем значении частоты  $\omega_{\text{ср}}$  диапазона измерений прибора, т. е.  $\omega_{\text{ср}}L = 1/\omega_{\text{ср}}C_2$ .

В этом случае ток  $I_{2\text{рез}}$  совпадает по фазе с напряжением

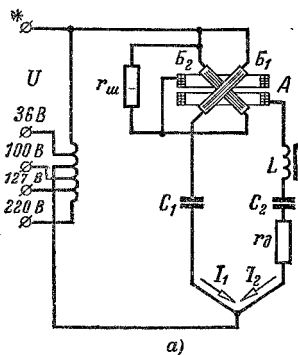


Рис. 10-7. Фазоуказатель типа И517.

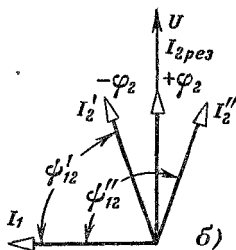


Рис. 10-8. Схема (а) частотомера типа Д506 и его векторная диаграмма (б).

$U$  и отстает от тока  $I_1$  на  $90^\circ$  (рис. 10-8, б). Поэтому действующий на катушку  $B_1$  момент равен нулю [ $M_1 = kI_1I_{2\text{рез}} \cos 90^\circ = 0$ ]. Вращающий момент  $M_2$ , созданный током  $I_2$ , идущим по катушкам  $A$  и  $B_2$ , повернет катушку  $B_2$  в поло-

жение, при котором оси магнитных потоков катушек  $A$  и  $B_2$  совпадут.

При отклонении частоты от ее резонансного значения ток  $I_2$  будет изменяться. Увеличение частоты вызовет сдвиг тока  $I_2$  от напряжения на угол одного знака, а уменьшение частоты — на угол другого знака.

При частоте, отличной от резонансной, на подвижную часть, кроме вращающего момента  $M_2$ , действует момент  $M_1 \neq 0$ , так как угол сдвига между током  $I_1$  в катушке  $B_1$  и током  $I_2$  в катушке  $A$  отличается от  $90^\circ$  ( $\psi_{12} \neq 0$ ). Под действием моментов  $M_1$  и  $M_2$  подвижная часть устанавливается в положение, зависящее от частоты, в котором моменты уравновешивают друг друга.

Частотомер включается в измеряемую цепь через автотрансформатор с номинальным первичным напряжением 36—100—127—220 В. Пределы измерений частоты прибора составляют 10% среднего значения, которое для приборов колеблется от 50 до 1 500 Гц. Класс точности его 0,2.

Рис. 10-9. Частотомер типа ДЗ40.

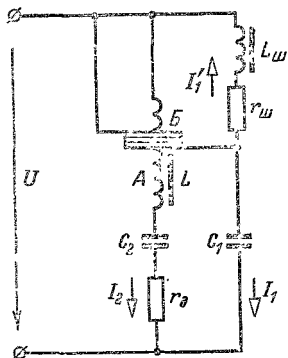
Примером применения ферродинамического логометра для

измерения частоты может служить щитовой частотомер типа ДЗ40 (рис. 10-9).

Подвижная катушка логометра  $B$ , шунтированная индуктивностью  $L_{ш}$  и резистором  $r_{ш}$ , вместе с конденсатором  $C_1$  образует первую параллельную ветвь прибора.

Неподвижная катушка  $A$  с индуктивностью  $L$ , конденсатором  $C_2$  и добавочным резистором  $r_d$  образует вторую параллельную ветвь. Она, как и в частотомере Д506, настроена в резонанс ( $\omega_{ср}L = 1/\omega_{ср}C$ ), при котором ток  $I_{2рез}$  совпадает по фазе с напряжением; если пренебречь влиянием шунта, ток  $I_{2рез}$ , кроме того, будет отставать от тока  $I_1$  на угол  $\psi_{12} \approx 90^\circ$ . При резонансной частоте  $\omega_0 = \omega_{ср}$  вращающий момент от взаимодействия токов  $I_1$  и  $I_2$ , действующий на подвижную катушку  $B$ , будет равен нулю ( $M = kI_1I_{2рез} \cos 90^\circ = 0$ ).

Если магнитный поток катушки  $A$  пронизывает витки катушки  $B$ , расположенной произвольно, то в них будет



индуктироваться э. д. с., а так как катушка  $B$  замкнута шунтом ( $L_{ш}$  и  $r_{ш}$ ), то в этом контуре возникнет ток  $I_1$ . Взаимодействие тока  $I_1$  с магнитным полем катушки  $A$  вызовет дополнительный вращающий момент. Он стремится повернуть и установить катушку  $B$  так, чтобы витки ее расположились в плоскости, параллельной магнитным линиям поля катушки  $A$ , т. е. в такое нейтральное положение, в котором э. д. с. не наводится. Следовательно, только в этом нейтральном положении и может находиться подвижная катушка при резонансной частоте  $\omega_0 = \omega_{ср}$ .

При измеряемой частоте, отличающейся от резонансной, взаимодействие токов  $I_1$  и  $I_2$  вызовет вращающий момент, поворачивающий подвижную катушку до тех пор, пока он не уравновесится дополнительным моментом.

Направление поворота подвижной части определяется тем, какой будет измеряемая частота — большей или меньшей резонансной.

Частотомер типа ДЗ40 имеет класс точности 2,5.

Пределы измерения частоты составляют  $\pm 10\%$  среднего значения частоты (50 и 200 Гц).

#### 10-5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Электромагнитный частотомер (рис. 10-10, а) представляет собой логометр (§ 2-2). В одной параллельной ветви прибора соединены катушка логометра  $A_1$ , конденсатор  $C_1$

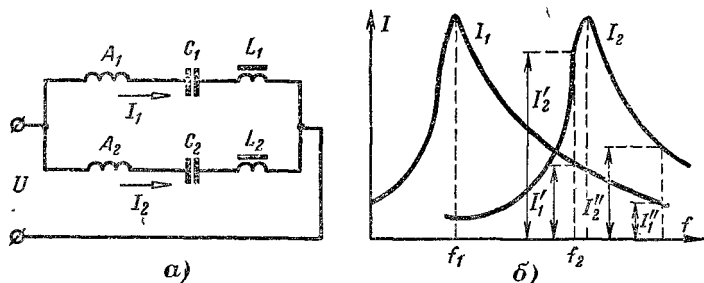


Рис. 10-10. Схема электромагнитного частотомера типа ЭЧ (а) и кривые токов в параллельных ветвях частотомера (б).

и катушка  $L_1$ , которые настроены в резонанс при частоте  $f_1$ . Другая параллельная ветвь аналогична первой и настроена в резонанс на другую частоту  $f_2$ .

Кривые токов в катушках прибора в зависимости от частоты (рис. 10-10, б) показывают, что при изменении

частоты от  $f_1$  до  $f_2$  каждому значению частоты соответствует определенное отношение токов  $I_1/I_2$ , а следовательно, и определенный угол поворота подвижной части. На шкале прибора наносятся значения частоты.

Из графиков тока видно, что некоторые отношения токов  $I_1/I_2$ , имеющие место при частотах, находящихся в границах шкалы прибора  $f_1 - f_2$ , могут иметь место и за их пределами, например отношение  $I'_1/I'_2 = I''_1/I''_2$ ; следовательно, у этих частотомеров могут быть области ложных показаний.

Частотомеры типа ЭЧ имеют класс точности 1,5 и 2,5, номинальную частоту от 50 до 1 500 Гц и номинальное напряжение 36, 100, 127 и 220 В.

### 10-6. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Этот частотомер состоит из магнитоэлектрического логометра и схемы (рис. 10-11). Первая ветвь содержит катушку  $L_1$ , конденсатор  $C_1$  и двухполупериодный выпрямитель  $B_1$ .

Вторая ветвь состоит из резистора с активным сопротивлением ( $r_2$ ) и второго выпрямителя  $B_2$ . Выпрямленные токи проходят через соответствующие рамки логометра.

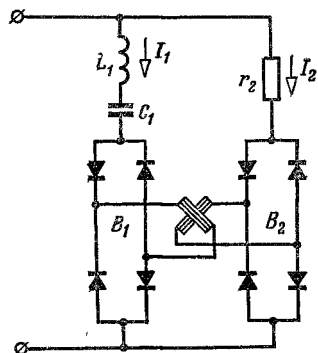


Рис. 10-11. Схема выпрямительного частотомера.

Следовательно, отношение сопротивлений параллельных ветвей и угол поворота подвижной части логометра зависят от частоты:

$$\alpha = F(r_2/z_1) = F_1(f).$$

Для повышения чувствительности прибора к частоте в рабочем диапазоне его частот индуктивность  $L_1$  и ем-

Угол поворота подвижной части логометра согласно (2-8), определяемый отношением токов, зависит от отношения сопротивлений параллельных ветвей:

$$\alpha = F(I_1/I_2) = F(r_2/z_1).$$

Сопротивление первой ветви

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + [2\pi f L_1 - 1/(2\pi f C_1)]^2}$$

при изменении частоты изменяется. Сопротивление второй ветви от частоты не зависит.

кость  $C_1$  подбираются с таким расчетом, чтобы первая параллельная ветвь находилась в режиме, соответствующем восходящей части резонансной кривой тока. В этом случае незначительное изменение частоты сильно изменяет сопротивление этой ветви ( $z_1$ ), а следовательно, и угол поворота подвижной части частотомера.

Прибор включается через фильтр (на рис. 10-11 не показан), уменьшающий влияние формы кривой напряжения на показание прибора.

### 10-7. МОСТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ

Схема одного из мостов для измерения частоты дана на рис. 10-12. Равновесие моста определяется условием:  $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ . Для рассматриваемой схемы имеем:

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{r_1} + j\omega C_1; \quad Z_2 = r_2;$$

$$Z_3 = r_3 - j \frac{1}{(\omega C_3)} \quad \text{и} \quad Z_4 = r_4.$$

Условия равновесия моста примут вид:

$$r_4 \frac{r_1}{1 + j\omega C_1 r_1} = r_2 \left( r_3 - j \frac{1}{\omega C_3} \right)$$

или

$$\frac{r}{r_2} = \frac{r_3}{r_1} + \frac{C_1}{C_3} + j \left( \omega C_1 r_3 - \frac{1}{\omega C_3 r_1} \right).$$

Приравняв вещественные и мнимые части, получим:

$$r_4/r_2 = r_3/r_1 + C_1/C_3 \quad (10-2)$$

и

$$\omega C_1 r_3 - 1/(\omega C_3 r_1) = 0; \quad (10-3)$$

из последнего равенства

$$\omega = 1/\sqrt{r_1 r_3 C_1 C_3}.$$

Выполнив условия

$$r_1 = r_3 = r \quad \text{и} \quad C_1 = C_3 = C$$

согласно (10-2), получим:

$$r_4/r_2 = 2 \quad \text{или} \quad r_4 = 2r_2,$$

а измеряемая частота

$$f = \omega/(2\pi) = 1/(2\pi r C). \quad (10-4)$$

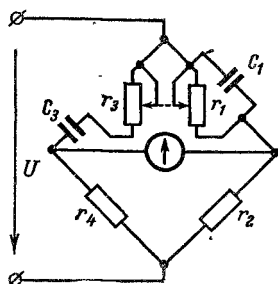


Рис. 10-12. Схема моста для измерения частоты.

Емкость  $C$  постоянна, поэтому измеряемая частота

$$f = k(1/r) = kg,$$

т. е. она пропорциональна проводимости  $g$ .

Рукоятки магазинов резисторов  $r_1$  и  $r_3$  связываются механически для выполнения условия  $r_1 = r_3$ .

Гармоники в кривой напряжения, частота которого измеряется, затрудняют уравнивание моста. Включение фильтра последовательно с индикатором облегчает уравнивание моста. При применении в качестве нулевого индикатора телефона уравнивает мост только по звуку основного тона. Погрешность измерений таким мостом 0,1—0,5%, область применения его 100 Гц—100 кГц.

## Глава одиннадцатая РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

### А. САМОПИШУЩИЕ ПРИБОРЫ

#### 11-1. НАЗНАЧЕНИЕ САМОПИШУЩИХ ПРИБОРОВ

Для нормальной эксплуатации установки или для правильного ведения технологического процесса часто бывает необходимо производить запись той или иной измеряемой величины. Приборы для записи измеряемой величины в течение длительного времени называются самопишущими приборами.

Самопишущий прибор имеет измерительный механизм с указателем, положение которого фиксируется на бумаге, перемещающейся с постоянной скоростью.

По способу записи приборы делятся на приборы с непрерывной записью и приборы с точечной записью.

#### 11-2. ПРИБОРЫ С НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАПИСЬЮ

Устройство одного из приборов с непрерывной записью дано на рис. 11-1. На оси измерительного механизма укреплен дугообразный держатель  $1$  с капиллярным пером и указательной стрелкой. Капиллярное перо (рис. 11-2,  $a$ )



представляет собой тонкую стеклянную Г-образную трубку, нижний конец которой расположен в неподвижной чернильнице 3, а верхний прикасается к бумаге 2. Капиллярные силы поднимают чернила к верхнему концу трубки, оставляя след в точке соприкосновения пера с бумагой. Перо

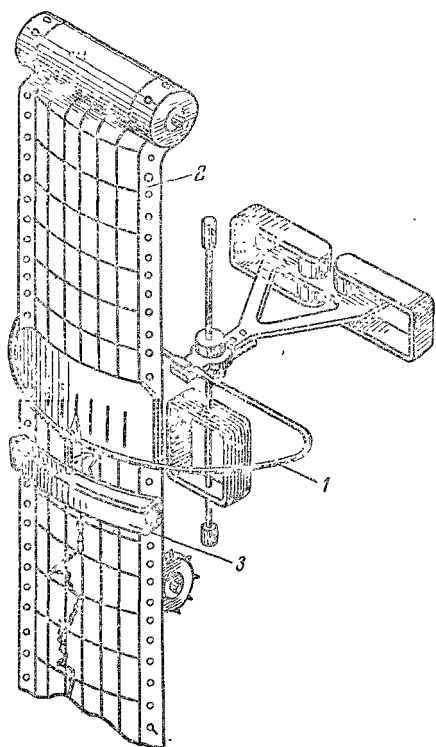


Рис. 11-1. Устройство самопишущего прибора с непрерывной записью.

может вращаться вокруг оси подвеса, прижимаясь к бумаге силой тяжести.

Диаграммная бумага при помощи небольшого синхронного двигателя или часового механизма с постоянной скоростью перемещается сверху вниз (ось  $y$ ), а перо — в перпендикулярном направлении (ось  $x$ ), при этом перо вычертит кривую регистрируемой величины в системе координат  $y - x$ .

На рис. 11-2, б показано перо-чернильница. Оно представляет собой тонкостенный конус с двумя отверстиями, одно — для заполнения пера чернилами, другое — для подачи чернил на бумагу. Это перо также подвешивается свободно, с тем чтобы оно имело возможность легко перемещаться по бумаге. Применяются перья и других конструкций.

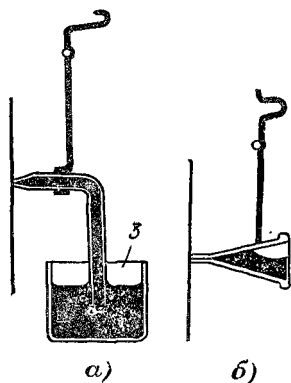


Рис. 11-2. Капиллярное перо с неподвижной чернильницей (а) и перо с чернильницей (б).

На рис. 11-3 дана схема устройства лентопротяжного механизма Краснодарского завода электроизмерительных приборов (ЗИП). Перфорированная бумага с рулона 1, пройдя ролик 2, поступает на тянущий барабан 3 со штифтами для перфорационных отверстий и, наконец, собирается на катушку

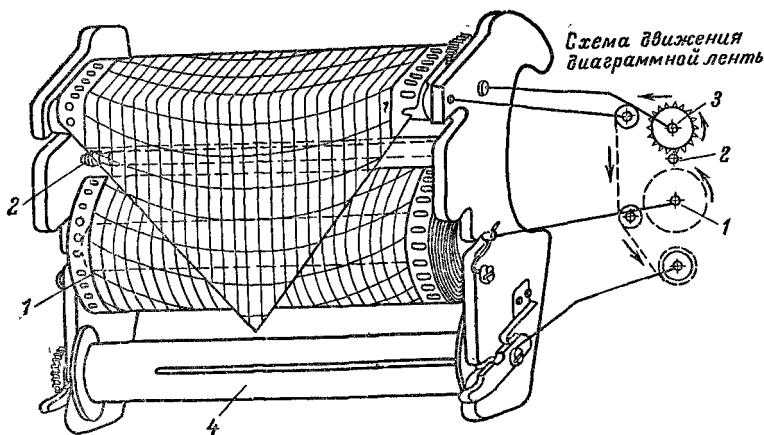


Рис. 11-3. Схема устройства лентопротяжного механизма краснодарского завода ЗИП.

4. Эта катушка и тянущий барабан приводятся в движение от синхронного двигателя. Запись производится на горизонтально расположенной части бумаги.

Выпрямляющее устройство, применяемое в некоторых самопишущих приборах, показано на рис. 11-4. На оси подвижной части 1 измерительного механизма укреплен рычажок, шарнирно связанный со стрелкой в точке 4. Верхний конец стрелки перемещается между параллелями 5 в вертикальном направлении, а нижний конец с конусным пером 2 перемещается в горизонтальной плоскости. При этом движении перо вычерчивает кривую измеряемой величины в

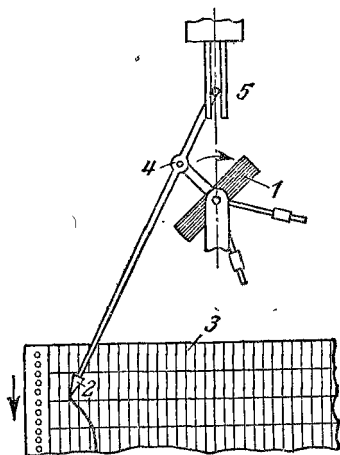


Рис. 11-4. Выпрямляющее эллиптическое устройство.

горизонтальной плоскости. При этом движении перо вычерчивает кривую измеряемой величины в

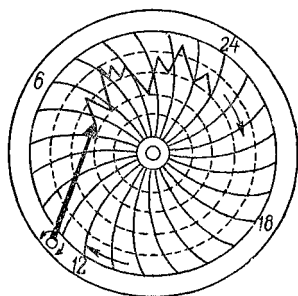


Рис. 11-5. Круговая диаграмма.

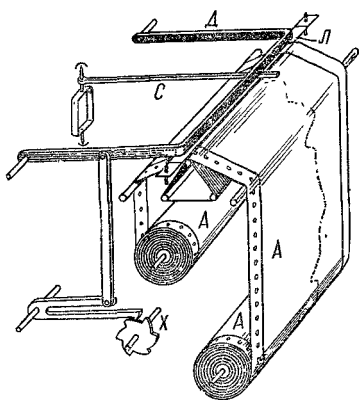
прямоугольных координатах, если одновременно с пером происходит движение бумаги 3 в перпендикулярном направлении (сверху вниз).

Кроме рассмотренных, применяются приборы, у которых запись измеряемой величины производится на круглой бумажной диаграмме (рис. 11-5). Бумага укрепляется на диске прибора, приводимом во вращение от часового механизма или синхронного электродвигателя. Диск обычно делает один оборот в сутки, так что получается наглядная суточная диаграмма измеряемой величины. Отсутствие дорогостоящего лентопотяжного механизма значительно снижает стоимость прибора.

### 11-3. ПРИБОРЫ С ТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСЬЮ

Схема устройства самопишущего прибора с точечной записью дана на рис. 11-6. На оси подвижной части измерительного механизма укреплена стрелка С. Под стрелкой

параллельно верхнему валу, через который переброшена диаграммная бумага *A*, расположена красящая лента *Л*. Стрелка всегда занимает положение, соответствующее значению измеряемой величины.



Над стрелкой расположена дуга *Д*, которая периодически несколько раз в минуту падает на стрелку и поднимается. При падении дуга прижимает стрелку к красящей ленте и бумаге, в результате чего на бумаге появляется точка, отмечающая значение измеряемой величины. Диаграммная бумага перемещается с постоянной скоростью, так же как и в приборах с непрерывной записью.

Рис. 11-6. Схема самопишущего прибора с точечной записью.

Точечная запись дает возможность одним прибором

производить измерение и запись нескольких величин. У таких приборов одновременно с подключением измерителя к той или иной измеряемой цепи происходит перемещение красящих лент, так что каждая измеряемая величина будет записываться точками определенного цвета, что облегчает чтение кривых.

#### 11-4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ЗАПИСИ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Для записи электрических величин при нормальных режимах работы установки достаточно иметь скорость движения диаграммной бумаги около 20—60 мм/ч. При аварийных режимах скорость движения бумаги должна быть значительно большей.

Отечественная промышленность изготавливает самопишущие приборы, предназначенные для работы при нормальных и аварийных режимах, например амперметры и вольтметры типа И385, частотомер типа И388. Это — выпрямительные приборы, у которых измерительный механизм магнитоэлектрической системы имеет дополнительную рамку, замкнутую на резистор, обеспечивающую быстрое успокоение (0,2 с).

Движение бумаги производится импульсным двигателем, один импульс обеспечивает перемещение бумаги на  $1/3$  мм. Импульсы получаются от датчика импульсов (приставка Р335). При нормальном режиме датчик дает 180 импульсов в час.

При наступлении аварийного режима происходит включение на 24 С второго аварийного датчика, дающего 30 импульсов в секунду (36 000 мм/ч).

#### 11-5. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Измерительный механизм самопишущего прибора с непрерывной записью должен обладать большим вращающим моментом, с тем чтобы значительное трение, в частности пера о бумагу, не вызывало увеличения погрешности прибора. Наиболее часто применяются измерительные механизмы магнитоэлектрической и ферродинамической систем. При точечной записи нет трения пера о бумагу, нет необходимости и в большом вращающем моменте.

Бумага для записи кривых закладывается в прибор в виде рулона. Длина ее 10—50 м, ширина 100—120 мм. С одной стороны бумаги прорезаются отверстия (перфорация), в которые входят штифты тянущего механизма.

Чем скорее изменяется регистрируемая величина, тем выше должна быть скорость движения бумаги. Она колеблется от 20 до 36 000 мм/ч. Хорошая запись получается при скорости движения бумаги, в 30—60 раз большей максимальной скорости движения пера. Для изменения скорости применяют сменные шестерни.

Качество записи зависит от качества бумаги, к которой предъявляют ряд требований. Чернила должны медленно сохнуть в чернильнице и быстро на бумаге. Вязкость их должна соответствовать типу пера.

При небольших скоростях записи применяются капиллярные перья и неподвижные чернильницы. Для разных скоростей применяют капилляры разного диаметра. При больших скоростях записи применяются перья-чернильницы.

Чистить перья можно только специальными приспособлениями. Перед наполнением чернилами перо промывают водой или спиртом.

### 11-6. НАЗНАЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Осциллограф — это прибор для записи кривых быстро изменяющихся величин. Осциллографы делятся на светолучевые или электромеханические и электронно-лучевые или электронные.

Светолучевые осциллографы, подвижная часть измерительного механизма которых обладает заметной инерцией и частотой собственных колебаний до 10 кГц, применяется для наблюдений и записи электрических величин частотой до 2 кГц или непериодических величин длительностью до 1 мс.

Электронные осциллографы, подвижная часть которых создается электронным лучом, практически не обладающим инерцией, применяются для наблюдений и записи электрических величин частотой до сотен мегагерц или нелепериодических процессов длительностью до долей микросекунд.

### 11-7. СВЕТОЛУЧЕВЫЕ ИЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Светолучевые или электромеханические осциллографы обычно имеют магнитоэлектрические или ферродинамические измерительные механизмы.

Электромеханический осциллограф имеет несколько узлов: осциллографические гальванометры (вибраторы), оптическую систему, устройство для визуальных наблюдений, устройство для фотографирования и электрическую схему.

Осциллографический гальванометр магнитоэлектрической системы (рис. 11-7, а) имеет постоянный магнит 1, в поле которого находится петля 2 с зеркальцем 3. Петля опирается на призмы 4 и натягивается пружиной 5. Это устройство помещается в пластмассовом корпусе, наполненном для успокоения кремнийорганической жидкостью. В корпусе гальванометра имеется окно для лучей света.

От взаимодействия тока, проходящего по петле гальванометра, с полем магнита создается вращающий момент, который при малых углах поворота может быть выражен [см. (2-6)]:  $M = iBSw$ . Этот момент вызовет отклонение петли и поворот зеркальца (рис. 11-7, б и в). При малой

инерции и большой собственной частоте колебаний гальванометра угол поворота зеркала пропорционален мгновенному значению тока в гальванометре.

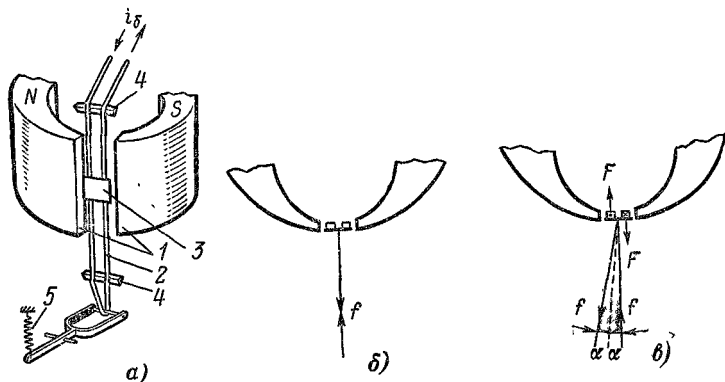


Рис. 11-7. Подвижная и неподвижная части гальванометра магнито-электрической системы.

При периодическом токе в петле гальванометра  $I$  зеркальце придет в колебательное движение. Если при этом на пути отраженного от зеркала луча поместить свето-

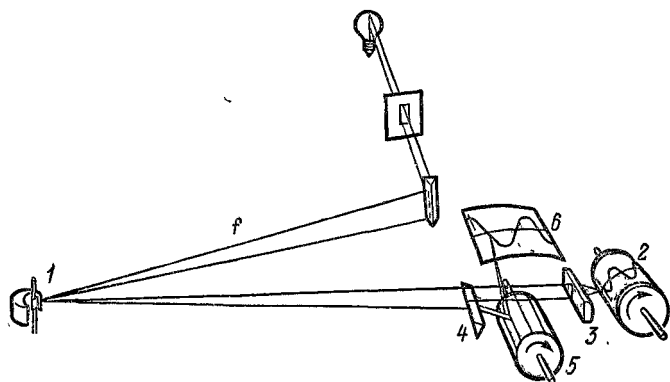


Рис. 11-8. Общая схема устройства и работы электромеханического осциллографа.

чувствительную фото пленку, укрепленную на цилиндре 2 (рис. 11-8), то на пленке, если она неподвижна, после проявления получится горизонтальная прямая. Длина ее равна перемещению по пленке отраженного луча света

и пропорциональна сумме положительной и отрицательной амплитуд тока.

Линза  $\mathcal{Z}$  фокусирует луч на поверхности пленки, вследствие чего линия получается тонкой и резко очерченной.

При вращении цилиндра с пленкой при неподвижной петле и отраженном от зеркала луче на пленке получится прямая, перпендикулярная первой.

При одновременном движении отраженного луча и вращении цилиндра  $\mathcal{Z}$  с постоянной скоростью луч вы-

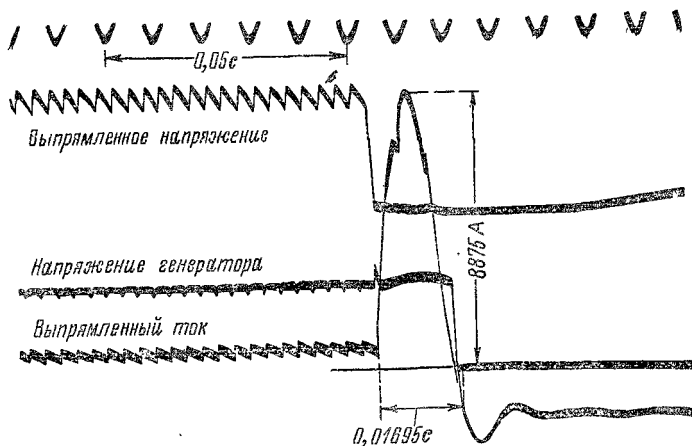


Рис. 11-9. Осциллограмма напряжения и тока ртутного выпрямителя при коротком замыкании.

чертит на пленке кривую тока, идущего по гальванометру — осциллограмму. ✓

Масштаб времени (абсциссу кривой) определяют, применяя отметчик времени. Он состоит из электромагнита, якорек которого колеблется с постоянной частотой, например 500 Гц. Отраженный от зеркала отметчика луч дает на пленке кривую с известным периодом (рис. 11-9).

Масштаб времени также легко определить, если по одному из гальванометров проходит ток известной частоты.

Если последовательно с гальванометром включить безреактивный добавочный резистор, то ток в гальванометре в каждый момент времени будет пропорционален напряжению и, следовательно, кривая тока в другом



масштабе будет кривой напряжения на зажимах цепи гальванометра.

Номинальный ток гальванометра не превышает 100 мА, поэтому при больших токах в цепи применяют шунты.

Для визуальных наблюдений часть пучка световых лучей, идущих от вибратора, при помощи линзы 4 (рис. 11-8) отделяется и направляется на вращающуюся зеркальную призму 5 и от нее на экран 6 с нижней стороны. Глаз наблюдателя расположен над экраном.

При неподвижной зеркальной призме и колебаниях зеркальца гальванометра луч, падающий на экран, вычертит на нем прямую линию, параллельную оси призмы. При неподвижном гальванометре и вращающейся призме луч вычертит на экране линию, перпендикулярную первой. При одновременном действии, т. е. при вращении призмы и колебаниях зеркальца гальванометра, луч света вычертит на экране кривую исследуемой величины. Для получения неподвижной кривой необходимо, чтобы световой луч, отраженный от зеркальной призмы, повторно описал на экране одну и ту же кривую. Для этого частота вращения зеркальной призмы должна быть синхронной, т. е. такой, при которой луч света перемещается по одной грани зеркальной призмы в течение времени, равного целому числу периодов.

Схема оптического устройства осциллографа типа Н102, имеющего восемь гальванометров, дана на рис. 11-10.

Пучок света от лампы 1 проходит конденсаторную линзу 2 и диафрагму 3, которая делит пучок света на восемь частей. Эти пучки, отражаясь от зеркал 4, 5 и 8 через линзы гальванометров 7, попадают на зеркала вибраторов 6. Отраженные от зеркал гальванометров лучи света проходят линзы 7 и попадают непосредственно или после отражения от зеркал 8 частично на зеркало 10 и частично на сферическую линзу 9. Часть луча, попавшая на зеркало 10, после отражения от него и зеркала 11 фокусируется линзой 12 на пленку 13. Другая часть луча, проходя через линзы 9 и 16, попадает на зеркальную призму 15 и после отражения — на экран 14.

Осциллограф предназначен для наблюдения и фотографирования восьми исследуемых величин.

Пленка и зеркальный барабан приводятся в движение от однофазного асинхронного двигателя. Коробка скоростей дает возможность иметь скорости движения пленки от 1 до 5 000 мм/с. Емкость кассет — 10 м пленки.

Металлический кожух имеет размеры  $560 \times 450 \times 220$  мм.

Наряду с рассмотренным петлевым гальванометром применяются магнитоэлектрические рамочные гальванометры. Подвижная часть такого гальванометра, состоящая из узкой рамки с небольшим числом витков, крепится на растяжках. Чувствительность их значительно больше, чем у петлевых, а частота собственных колебаний, на-

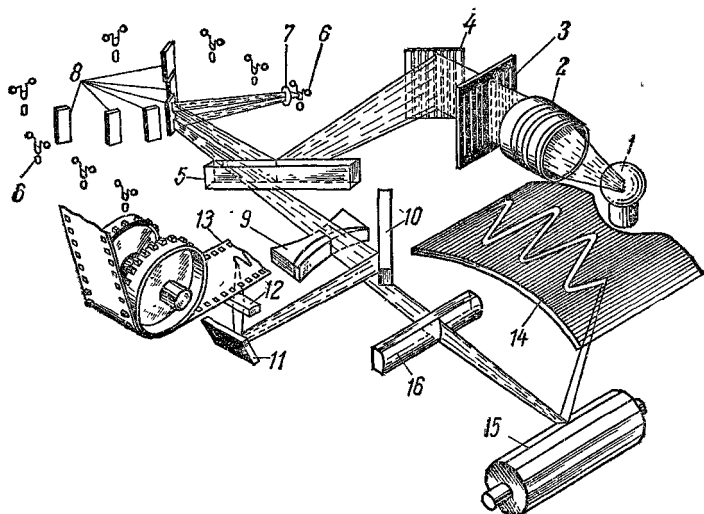


Рис. 11-10. Схема работы осциллографа типа Н102.

оборот, значительно меньше (табл. 11-1). Они широко применяются для измерения неэлектрических величин.

В осциллографических гальванометрах мощности ферродинамической системы на кольцевой сердечник из пермаллоя накладывается неподвижная обмотка. В воздушном зазоре этого сердечника расположена петля с зеркалом. Для успокоения корпус гальванометра заполняется кремнийорганической жидкостью.

Включив неподвижную обмотку в цепь тока, а петлю гальванометра с безреактивным добавочным резистором — на напряжение цепи, получим вращающий момент гальванометра, пропорциональный мгновенной мощности цепи:

$$M = k_1 i i_U = k_1 i \frac{u}{r_U} = k_2 i u = k_2 p.$$

**Вибраторы (осциллографические гальванометры)  
осциллографов Н102 и МН02**

Тип гальванометра	Номинальная частота, Гц	Постоянная по току, (А/мм)/ $10^{-6}$	Чувствительность, мм/(мА·м)	Сопротивление, Ом	Максимальная допустимая амплитуда тока, мА	Примечание
Н135-0,6	600	19	52	9	2	} Петлевые
Н135-0,9	900	50	20	9	5	
Н135-1,5	1 500	170	6	9	16	
Н135-2	2 000	500	2	4	50	
Н135-3	3 000	1 000	1	4	100	
Н135-6	6 000	6 200	0,16	2	250	
МОВ2-IV	3 000	1 000	1	6	25	} Рамочные
МОВ2-IX	400	4	250	50	1	
МОВ2-X	200	1	1 000	50	0,25	

Пропорциональным мощности будет и угол поворота зеркальца гальванометра, следовательно, можно получить кривую мгновенной мощности цепи.

Чувствительность гальванометра

$$S_I = \alpha/I = BSw/D, \quad (11-1)$$

а частота собственных колебаний

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{J}}, \quad (11-2)$$

где  $J$  — момент инерции гальванометра.

Увеличение удельного противодействующего момента ( $D$ ) вызывает увеличение частоты собственных колебаний гальванометра (11-2) и уменьшение его чувствительности (11-1). Поэтому высокочастотные гальванометры имеют малую чувствительность, а высокочувствительные — малую частоту колебаний (табл. 11-1).

Гальванометры небольшой чувствительности (1—2 мм/мА) с невысокой частотой колебаний (2—3 кГц) являются универсальными, устойчивыми в работе и поэтому применяются наиболее часто.

Выбирая гальванометр, следует помнить, что гальванометр записывает без искажений колебания с частотой не выше  $1/5$ — $1/10$  частоты собственных колебаний, например гальванометр с собственной частотой колебаний 5 000 Гц дает запись без искажений до 500 Гц.

Выбрав гальванометр по частоте, следует убедиться в его достаточной чувствительности; если она недостаточна, можно применить усилитель.

### 11-8. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЛИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Электронные осциллографы делятся на осциллографы с холодным катодом и осциллографы с накаливаемым катодом. У первых для получения электронного луча используют явление электростатической эмиссии, для чего между

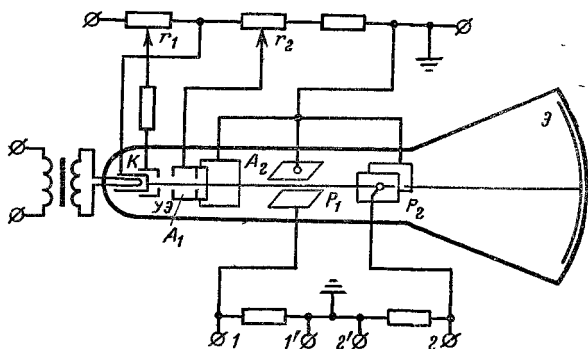


Рис. 11-11. Электронно-лучевая трубка.

катодом и анодом создают электрическое поле с большой напряженностью, используя высокое напряжение около 70 кВ. Эти осциллографы применяются в высоковольтной измерительной технике и в данном курсе не рассматриваются. У вторых для получения электронного луча используется явление термоэлектронной эмиссии.

Основной частью осциллографа с накаливаемым катодом является электронно-лучевая трубка (рис. 11-11), представляющая собой стеклянную колбу, в которой создан вакуум. В суженном конце колбы расположено устройство, получившее название «электронной пушки» или «электронного прожектора», предназначенное для получения узкого пучка электронов — электронного луча.

Электронная пушка (рис. 11-12) состоит из подогретого катода  $K$ , управляющего электрода  $УЭ$  или сетки и двух анодов  $A_1$  и  $A_2$ .

Кроме электронной пушки, в трубке находятся две пары отклоняющих пластин  $P_1$  и  $P_2$ , расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях, и экран  $\mathcal{E}$ . Он образован покрытием внутренней поверхности расширенного торца трубки слоем люминофора, например сернистого цинка, обладающего способностью светиться под действием ударяющихся в него электронов.

Катод — это металлический цилиндр с оксидным покрытием торца, чем достигается излучение электронов в одном направлении. Цилиндр надевается на фарфоровую трубку, внутри которой помещается нить подогрева.

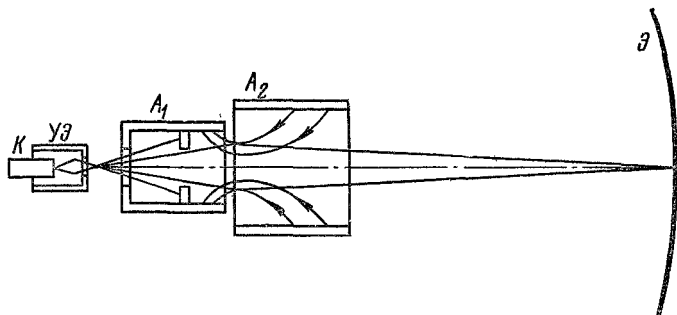


Рис. 11-12. Фокусировка электронного луча.

Управляющий электрод, имеющий форму цилиндра с отверстием в торце, служит для регулирования количества электронов в луче и для его начального формирования. Он имеет отрицательный потенциал относительно катода. Электроны, вылетевшие из катода, под действием электрического поля будут отклоняться к оси луча. При увеличении отрицательного потенциала управляющего электрода часть электронов, получив еще большее отклонение, не пройдет через отверстие электрода. Следовательно, изменением потенциала можно регулировать количество электронов в луче и яркость пятна на экране.

Пройдя управляющий электрод, электроны опять будут отклоняться от оси луча.

Для дальнейшей фокусировки луча применяются два цилиндрических анода  $A_1$  и  $A_2$  (рис. 11-12). Оба анода имеют положительные потенциалы относительно катода, первый из них — меньший, второй — больший (1—4 кВ). Электроны, попав в электрическое поле анодов, отклоняются в направлении к оси луча и получают ускорение

в направлении движения. Таким образом, поле анодов  $A_1$  и  $A_2$  действует на электронный луч как собирающая линза, фокусируя его в точке, лежащей на оси трубки на экране Э (рис. 11-12). Фокусировка производится регулировкой потенциала анода  $A_1$ . В месте соприкосновения электронного луча с экраном будет маленькое резко очерченное светящееся пятно (точка).

Воздействуя на электронный луч электрическим полем, можно вызвать его отклонение. Допустим, что электронный луч совпадает с осью трубки, о чем можно судить по светящейся точке в центре экрана. Приложив к отклоняющим пластинам (рис. 11-11 и 11-13) постоянное напряжение  $U$ , получим между ними электрическое поле, которое вызовет отклонение луча, и он встретится с экраном уже в другой точке, отстоящей от осевой линии на расстоянии

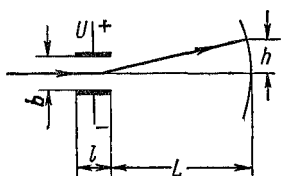


Рис. 11-13. Отклонение электронного луча под действием электрического поля.

где  $U_a$  — анодное напряжение.

$$h = 0,5 \frac{U}{U_a} \frac{l}{b} \left( L + \frac{l}{2} \right) \approx 0,5 \frac{U}{U_a} \frac{l}{b} L,$$

где  $U_a$  — анодное напряжение.

Отклонение электронного луча на экране при изменении напряжения на отклоняющих пластинах на 1 В называется чувствительностью трубки к напряжению:

$$S_U = h/U = 0,5 L l / (U_a b).$$

Чувствительность трубок  $S_U = 0,2 \div 0,5$  мм/В.

Перемещение электронного луча под воздействием электрического поля исследуемой величины происходит в одной плоскости, в нашем случае — в плоскости рисунка. Для получения кривой исследуемой величины необходимо вызвать перемещение луча в плоскости, перпендикулярной к первой, полем вспомогательного напряжения (напряжения развертки), приложенного ко второй паре пластин  $P_2$ .

Если к каждой из пар отклоняющих пластин будет приложено периодическое напряжение, то луч, перемещаясь по экрану, будет описывать определенную замкнутую кривую — фигуру Лиссажу. Форма этой фигуры зависит от характера кривых напряжений, действующих между отклоняющими пластинами, от отношения амплитуд, частот и сдвига фаз. По фигуре Лиссажу можно найти исследуемую кривую.

Исследуемую периодическую кривую обычно получают непосредственно в прямоугольных координатах на экране осциллографа. Для этого вспомогательное напряжение, приложенное к паре отклоняющих пластин  $P_2$ , должно быть пилообразным (рис. 11-14, а). В начальный момент времени  $t_1$  напряжение равно нулю. Затем оно увеличивается пропорционально времени, достигая в конце периода исследуемой величины  $t_5$  своей амплитуды  $U_{mвсп}$  (рис. 11-14, б). Это напряжение при отсутствии исследуемой величины вызовет перемещение электронного луча по экрану с постоянной скоростью по прямой из точки  $a_1$  в точку  $a_5$  (рис. 11-14).

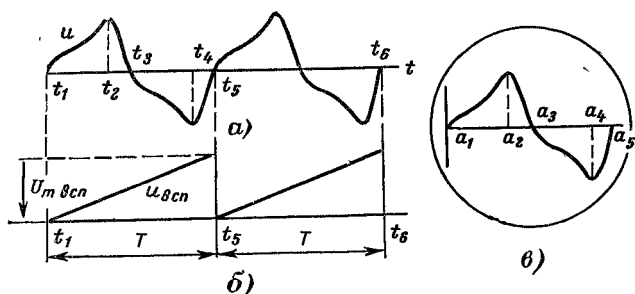


Рис. 11-14. Кривые исследуемого и вспомогательного напряжений.

Если одновременно на электронный луч будет действовать еще и электрическое поле между парой отклоняющих пластин  $P_1$ , созданное исследуемым напряжением  $u$ , то электронный луч под влиянием этого поля, кроме того, будет отклоняться по экрану в вертикальном направлении на величину, пропорциональную мгновенному значению исследуемого напряжения. Следовательно, электронный луч в течение периода вычертит на экране кривую исследуемой величины (рис. 11-14, в).

Достигнув своей амплитуды в момент  $t_5$ , вспомогательное напряжение мгновенно падает до нуля, и в соответствии с этим электронный луч мгновенно из точки  $a_6$  перемещается по прямой в точку  $a_1$ . После этого вспомогательное напряжение вновь начнет увеличиваться пропорционально времени и электронный луч в течение второго и следующего периодов будет повторять свое движение.

Световая инерция экрана способствует получению на нем устойчивой кривой исследуемой величины. Однако этого недостаточно, так как устойчивая кривая обеспечивается, если отношение периодов пилообразного и исследуемого напряжений составляет целое число. Так, например, если это отношение равно  $n$ , то на экране будет  $n$  периодов исследуемой кривой.

Действительные кривые пилообразного напряжения отличаются от рассмотренной. В частности, спадающая часть кривой бывает не вертикальной, а наклонной, т. е. изменение напряжения от амплитуды его до нуля происходит не мгновенно, а в течение какой-то малой части периода. Это вызывает выпадение из кривой напряжения

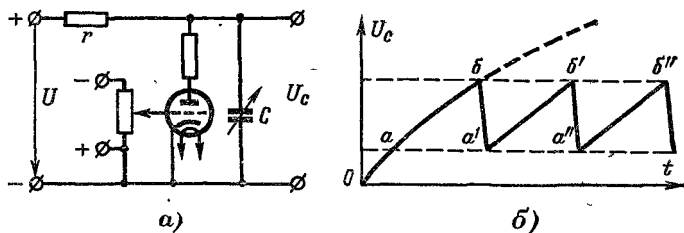


Рис. 11-15. Схема тиратронного генератора пилообразного напряжения и его кривая.

соответствующей части ее. Обратное движение луча из точки  $a_5$  в точку  $a_1$  происходит значительно быстрее, чем прямое движение его. Кроме того, обратный ход луча гасят, и на экране он не виден.

Пилообразное напряжение получают от ламповых (релаксационных) генераторов, схема одного из них с применением тиратрона дана на рис. 11-15, а.

После включения постоянного напряжения  $U$  конденсатор  $C$  будет заряжаться через резистор  $r$ . Напряжение на нем будет увеличиваться по кривой  $Oab$  (рис. 11-15, б) до тех пор, пока оно не достигнет напряжения зажигания тиратрона (точка  $b$ ), при котором сопротивление тиратрона резко уменьшается. С этого момента конденсатор начнет разряжаться через тиратрон, а напряжение на нем — быстро уменьшаться. Разряд конденсатора и уменьшение напряжения на нем прекратятся, когда будет достигнуто напряжение гашения тиратрона (точка  $a'$ ). С этого момента конденсатор снова начнет заряжаться, а напряжение на нем — увеличиваться до напряжения зажигания



иратрона и т. д. Следовательно, напряжение на выходе удет изменяться по кривой  $аба' б' а'' б''$  и т. д.

Напряжение зажигания тиратрона регулируют изменением потенциала сетки тиратрона, а частоту генератора — изменениями емкости конденсатора  $C$  и сопротивления резистора  $r$ .

Чувствительность обеих пар отклоняющих пластин напряжению мала, поэтому исследуемое и пилообразное напряжение сначала усиливаются, а затем подводятся к отклоняющим пластинам. Электронные осциллографы меют два канала усиления: один — для вертикально отклоняющих пластин  $P_1$ , второй — для горизонтально отклоняющих пластин  $P_2$ . Обычно применяются электронные усилители с несколькими каскадами усиления.

Для одновременного исследования двух периодически изменяющихся величин применяются или двухлучевые осциллографы (не получившие широкого применения), или специальные электронные коммутаторы, например, типа ЭК-1. Этот коммутатор производит посередное включение то одной, то другой исследуемой величины, воздействующей на электронный луч осциллографа, что приводит к получению на экране одновременно двух кривых исследуемых величин.

Электронный осциллограф применяется не только для получения кривых напряжения, но и для измерения ряда электрических величин: напряжения, тока, частоты,  $\cos \varphi$ , интервалов времени и др. Кроме того, он применяется как нулевой индикатор в мостах переменного тока и в сочетании с измерительными преобразователями — для измерения некоторых неэлектрических величин.

Приложив измеряемое напряжение к одной паре отклоняющих пластин осциллографа, получим на экране прямую линию, длина которой пропорциональна удвоенной амплитуде измеряемого напряжения. Измерив длину этой линии и зная постоянную по напряжению при данном режиме работы осциллографа, можно определить амплитуду напряжения.

Для измерения тока к одной паре отклоняющих пластин подводят напряжение, созданное измеряемым током на образцовом резисторе. Определив (как описано выше) амплитуду напряжения, зная сопротивление образцового резистора, нетрудно определить, пользуясь законом Ома, и амплитуду тока.

Для измерения частоты к одной паре отклоняющих пластин, например  $P_1$ , подводится напряжение измеряемой частоты  $f_x$ , к другой паре пластин  $P_2$  — напряжение известной частоты  $f_y$  от измерительного генератора с регулируемой частотой.

Если подобрать частоту  $f_y$  так, чтобы на экране установилась одна из простейших фигур Лиссажу (рис. 11-16), то это укажет, что отношение частот  $f_x/f_y$  равно отношению числа точек перенесения фигуры Лиссажу с линией  $x-x$ ,

$\frac{f_x}{f_y} \varphi$	$0$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$
$1:1$	/	○	○	○	\
$1:2$	∞	∞	∪	∩	∞
$1:3$	∩	∩	∩	∩	∩
$2:3$	∩	∩	∩	∩	∩

Рис. 11-16. Фигуры Лиссажу при одинаковых амплитудах, но разных отношениях частот и различных углах сдвига фаз.

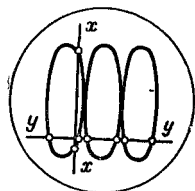


Рис. 11-17. Фигура Лиссажу.

проведенной параллельно отклоняющим пластинам  $P_1$ , к числу точек пересечения той же фигуры с линией  $y-y$ , проведенной параллельно отклоняющим пластинам  $P_2$ . Например, фигура Лиссажу (рис. 11-17) пересекается с линией  $x-x$  2 раза, а с линией  $y-y$  6 раз, следовательно, имеем:

$$f_x/f_y = 2/6 = 1/3,$$

откуда  $f_x = (1/3)f_y$ .

Если  $f_y = 1\ 200$  Гц, то  $f_x = 1\ 200 (1/3) = 400$  Гц.

Отечественная промышленность выпускает большое число разнообразных однолучевых электронных осциллографов, например ЭНО-1; ЭМО-2; ЭО-7; ЭО-53М и др., а также двухлучевых, например ДЭСО-1; ОК-17М; ОК-21 и др.

## 12-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Электрические и магнитные явления неразрывно связаны друг с другом. Свойства ферромагнитных материалов влияют на характеристики электрических машин, аппаратов, приборов, в которых они применяются. Поэтому электротехника не может обойтись без измерений магнитных величин и без изучения свойств магнитных материалов и конструкций.

12-2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО  
МАГНИТНОГО ПОТОКА

## а) Баллистический гальванометр

Для измерения магнитного потока баллистический гальванометр, измерительная катушка и резистор  $r_1$  соединяются последовательно (рис. 12-1), образуя цепь с сопротивлением  $r = r_{б.г} + r_{и.к} + r_1$ .

Быстрое удаление катушки из измеряемого магнитного поля или быстрое ее внесение в поле сопровождается изменением магнитного потока, пронизывающего катушку, и появлением в ней э. д. с.

$$e = -w_{и.к} d\Phi/dt, \quad (12-1)$$

а следовательно, и тока

$$i = e/r = - (w_{и.к}/r) (d\Phi/dt), \quad (12-2)$$

откуда электрический заряд  $idt$ , возникающий при изменении магнитного потока на величину  $d\Phi$  за время  $dt$ , выражается так:

$$dQ = i dt = - \frac{w_{и.к}}{r} d\Phi.$$

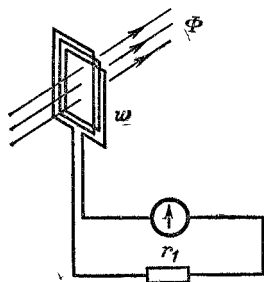


Рис. 12-1. Схема соединения для измерения магнитного потока баллистическим гальванометром.

Электрический заряд, который пройдет по цепи за время  $\tau$ , если магнитный поток изменится от 0 до  $\Phi$ , будет:

$$Q = \int_0^{\tau} i dt = -\frac{w_{и.к}}{r} \int_0^{\Phi} d\Phi = -\frac{w_{и.к}}{r} \Phi,$$

а если поток изменится от  $\Phi$  до нуля, то

$$Q = \frac{w_{и.к}}{r} \Phi. \quad (12-3)$$

В неподвижной измерительной катушке при изменении пронизывающего ее магнитного потока от  $+\Phi$  до  $-\Phi$ , вызванном переключением тока от  $+I$  до  $-I$ , возбуждается заряд

$$Q = 2 \frac{w_{и.к}}{r} \Phi. \quad (12-4)$$

Из (12-3) можно получить выражение для магнитного потока:

$$\Phi = \frac{r}{w_{и.к}} Q.$$

Заряд  $Q$ , проходя по цепи (рис. 12-1), вызывает отброс подвижной части гальванометра, который будет пропорционален заряду, если время протекания заряда будет достаточно мало по сравнению с периодом колебания гальванометра. Таким образом,

$$Q = C_q \alpha,$$

а магнитный поток

$$\Phi = \frac{r}{w_{и.к}} C_q \alpha = \frac{C_{\Phi}}{w_{и.к}} \alpha. \quad (12-5)$$

Величина  $C_{\Phi} = r C_q$  — это баллистическая постоянная, выражающая магнитный поток, отнесенный к одному делению шкалы (Вб/деление).

Следовательно, по баллистическому отбросу гальванометра можно определять магнитный поток.

Баллистическая постоянная зависит от сопротивления цепи гальванометра, так как при изменении сопротивления изменяется электромагнитное торможение. Ввиду этого при определении магнитного потока в (12-5) подставляют значение постоянной, соответствующее сопротивлению цепи гальванометра, которое было при измерении.

Для определения баллистической постоянной (рис. 12-2), установив ток  $I_1$ , при некотором сопротивлении  $r_M$  магна-

зана резисторов перебрасываем ножи переключателя из положения 1 в положение 2. При этом ток изменится от  $+I_1$  до  $-I_1$ , а потокосцепление вторичной обмотки катушки взаимной индуктивности  $M$  изменится на

$$2MI_1 = 2w_2\Phi_2. \quad (12-6)$$

Изменение потокосцепления вызовет протекание заряда  $Q$  и отброс гальванометра на угол  $\alpha$ .

Заряд (12-4)

$$Q = 2w_2\Phi_2/r_2 = 2MI_1/r_2,$$

а баллистическая постоянная

$$C_\Phi = r_2 \frac{Q}{\alpha} = 2MI_1/\alpha. \quad (12-7)$$

Определение постоянной  $C_\Phi$  производят при различных значениях резистора  $r_2$ , после чего строят график  $C_\Phi = f(r_2)$ , которым и пользуются при работе с баллистическим гальванометром.

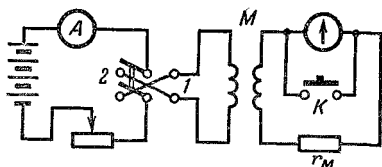


Рис. 12-2. Схема для определения баллистической постоянной гальванометра.

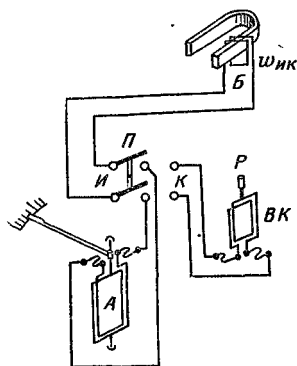


Рис. 12-3. Флюксметр.

### б) Милливеберметр (флюксметр)

Флюксметр — это разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы с ничтожным противодействующим моментом. В воздушном зазоре между полюсами магнита и стальным цилиндром расположена подвижная рамка  $A$  (рис. 12-3). Ток к ней подводится при помощи безмоментных подводов.

Поставив ножи переключателя в положение  $И$ , присоединим к рамке  $A$  надетую на магнит измерительную катушку  $B$ . Если затем катушку  $B$  быстро сдернуть с магнита, то в замкнутом контуре измерительная катушка — рамка  $A$  произойдет уменьшение потокосцепления  $w_{и,к}\Phi$ . Работа флюксметра основана на свойстве магнитного потока замкнутого контура сохраняться неизменным. Следовательно, уменьшение магнитного потока, сцепленного

с измерительной катушкой, вызовет поворот рамки  $A$  на угол  $\alpha$ , при котором произойдет увеличение потокосцепления рамки  $A$ , компенсирующее уменьшение потокосцепления измерительной катушки.

Магнитное поле флюксметра однородное и радиальное, поэтому изменение потокосцепления рамки будет пропорционально углу поворота ее  $\alpha$ , т. е.

$$w_p \Phi_p = BS w_p \alpha,$$

откуда

$$w_{п.к} \Phi = BS w_p \alpha,$$

следовательно,

$$\Phi = \frac{BS w_p}{w_{п.к}} \alpha = \frac{C}{w_{п.к}} \alpha, \quad (12-8)$$

где  $C$  — постоянная флюксметра; например, для прибора типа М419 она равна 0,1 мВб/деление.

**Пример. 12-1.** При сбрасывании измерительной катушки с постоянного магнита рамка флюксметра отклонилась на 25 делений. Постоянная флюксметра равна 0,1 мВб/деление, измерительная катушка имеет 10 витков. Магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку в том месте, где она была расположена до сбрасывания,

$$\Phi = \frac{C}{w_{п.к}} \alpha = \frac{0,1}{10} 25 = 0,25 \text{ мВб.}$$

Противодействующий момент флюксметра ничтожно мал. Поэтому для установки стрелки флюксметра в нулевое положение он имеет вспомогательный магнит, в воздушном зазоре которого расположена вспомогательная рамка  $BK$ .

Поставив ножи переключателя  $\Pi$  в положение  $K$  (корректор), рукояткой  $P$  поворачивают вспомогательную катушку, изменяя ее потокосцепление, это вызовет поворот катушки флюксметра, компенсирующий изменение потокосцепления вспомогательной катушки. Таким образом, можно производить установку стрелки флюксметра на нуль шкалы.

### 12-3. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ, НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

#### а) Баллистический гальванометр

Измерение магнитной индукции можно выполнить, используя процесс измерения магнитного потока (§ 12-2, а).

При однородном поле и витках измерительной катушки, расположенных перпендикулярно вектору магнитной ин-

дукции, имеем  $B = \Phi/S$ , или, используя (12-5), получаем:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{C_{\Phi}}{Sw_{\text{п. н}}} \alpha. \quad (12-9)$$

По баллистическому отбросу  $\alpha$  гальванометра находят значение магнитной индукции.

Для измерения напряженности постоянного магнитного поля используют баллистический гальванометр (флюксметр) с измерительной катушкой. При выключении или включении тока, возбуждающего испытуемое поле, в которое помещена измерительная катушка, будет баллистический отброс. Согласно (12-5)

$$\Phi w_{\text{п. н}} = \psi = C_{\Phi} \alpha. \quad (12-10)$$

Если напряженность поля по всему сечению измерительной катушки одинакова, то

$$\psi = \mu_0 H S w_{\text{п. н}},$$

а напряженность поля

$$H = \psi / (\mu_0 S w_{\text{п. н}}),$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Заменив  $\psi$  его выражением из (12-10), получим:

$$H = \frac{C_{\Phi}}{\mu_0 S w_{\text{п. н}}} \alpha = \frac{C_{\Phi}}{k} \alpha. \quad (12-11)$$

Определение напряженности поля  $H$  требует знания постоянных  $C_{\Phi}$  и  $k$ .

Для определения постоянной катушки  $k$  ее помещают в магнитное поле, напряженность которого  $H$  можно рассчитать, например поле соленоида. Замечая баллистический отброс гальванометра при включении или выключении тока соленоида, постоянную катушки согласно (12-11) определяют по формуле

$$k = \frac{C_{\Phi}}{H} \alpha. \quad (12-12)$$

При испытании ферромагнитных материалов напряженность поля в образце можно определить по напряженности поля на его поверхности. Это основывается на том, что тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля по обе стороны поверхности раздела двух сред имеют одинаковые значения.

Измерительная катушка должна быть плоской и тонкой (около 1 мм), так как поле при удалении от поверх-

ности убывает. Катушка наматывается из изолированной проволоки в два или четыре слоя на пластинку из изоляционного материала.

После определения постоянной катушка накладывается на поверхность образца. Ось ее должна совпадать с направлением поля. Затем она присоединяется к гальванометру.

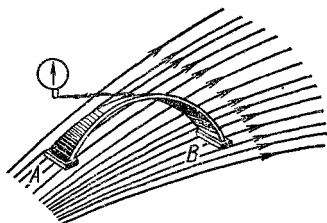
При включении или выключении тока, возбуждающего измеряемое поле, отсчитывают баллистический отброс и по (12-11) находят напряженность поля в образце.

Для измерения магнитного напряжения пользуются потенциалометром, или, что то же, магнитным поясом.

Он состоит из длинной (1 м) гибкой, плоской катушки с обмоткой из четного числа слоев (2—4), намотанных в одну сторону с одинаковой плотностью на сердечник из неферромагнитного материала. К концам обмотки, выведенным на середине пояса, присоединяется баллистический гальванометр (рис. 12-4).

Для измерения н. с. между точками поля *A* и *B* (рис. 12-4) концы пояса помещают в эти

Рис. 12-4. Схема для измерения магнитного напряжения при помощи потенциалометра (магнитного пояса).



точки. Включая или выключая ток, возбуждающий измеряемое поле, изменяют поток, сцепленный с поясом, и наблюдают баллистический отброс.

Потокосцепление пояса  $\psi = \Phi w$  согласно (12-5)

$$C_{\Phi} \alpha = \psi.$$

Потокосцепление с элементом пояса длиной  $dl$  и сечением  $S$

$$d\psi = \mu_0 H_t S w_0 dl,$$

где  $H_t$  — тангенциальная составляющая напряженности поля.

Потокосцепление всего пояса

$$\psi = \int_B^A d\psi = \mu_0 S w_0 \int_B^A H_t dl = \mu_0 S w_0 U_M, \quad (12-13)$$

так как  $\int_B^A H_t dl = U_M$ .



Из (12-13) следует:

$$U_M = \frac{\psi}{\mu_0 S w} = \frac{C_\Phi}{k} \alpha = C_\Pi \alpha, \quad (12-14)$$

где  $C_\Pi = C_\Phi/k$  — постоянная цепи пояс — гальванометр.

Для опытного определения постоянной пояса (рис. 12-5) вспомогательная катушка с числом витков  $w_1$  охватывается поясом, концы которого прижимаются друг к другу.

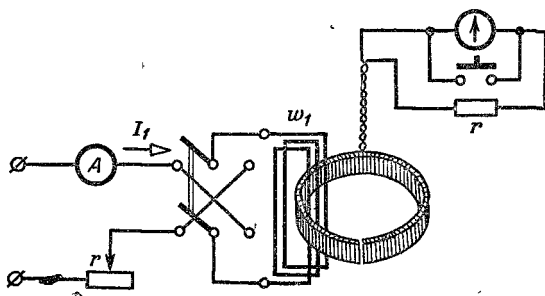


Рис. 12-5. Схема для определения постоянной магнитного пояса.

При включении или выключении тока  $I_1$  вследствие изменения магнитного потока, сцепленного с поясом, происходит баллистический отброс.

Согласно (12-4)  $U_M = C_\Pi \alpha$ , но в данном случае интеграл по замкнутому контуру  $\int H_l dl = U_M$  представляет собой полный ток вспомогательной катушки  $I_1 w_1$ . Следовательно,  $U_M = I_1 w_1 = C_\Pi \alpha$ , откуда постоянная пояса

$$C_\Pi = I_1 w_1 / \alpha. \quad (12-15)$$

### б) Измерение напряженности постоянного магнитного поля с использованием ядерного магнитного резонанса

Если на ядра какого-либо вещества, находящегося в постоянном магнитном поле, воздействовать еще и переменным магнитным полем высокой частоты, то при определенном соотношении между напряженностью  $H$  постоянного поля и частотой  $f$  переменного поля возможен режим резонансного поглощения ядрами вещества энергии переменного поля.

Согласно представлениям квантовой механики, например, ядро водорода — протон может иметь две ориентации магнитного момента во внешнем магнитном поле — по полю и против него.

Для измерения ориентации магнитного момента протона необходим квант энергии  $hf$ , где  $h$  — универсальная постоянная (постоянная Планка);  $f$  — частота.

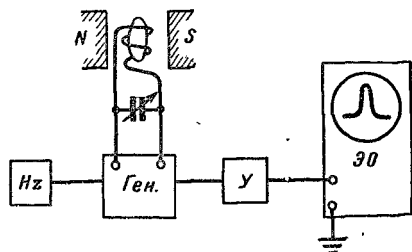


Рис. 12-6. Структурная схема для определения напряженности магнитного поля с использованием ядерного магнитного резонанса.

Разность энергий, соответствующая таким двум состояниям протона, составляет  $2m_pH$ , где  $m_p$  — магнитный момент протона.

Таким образом,

$$hf = 2m_pH,$$

откуда

$$\omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{h} m_pH = \gamma_p H$$

или

$$H = 2\pi f / \gamma_p,$$

(12-16)

где  $\gamma_p$  — гиромагнитное отношение ядра, т. е. отношение магнитного момента ядра к его механическому моменту.

Гиромагнитное отношение ядер ряда веществ известно с погрешностью до тысячных долей процента.

Измерение напряженности постоянного магнитного поля сводится к измерению частоты, при которой наступает явление магнитного ядерного резонанса. Структурная схема установки для определения напряженности постоянного магнитного поля дана на рис. 12-6.

В измеряемом магнитном поле помещается катушка, внутри которой расположена ампула, содержащая протоны, например водный раствор  $Fe(NO_3)_3$ . Ось катушки расположена перпендикулярно направлению постоянного магнитного поля. Катушка вместе с конденсатором образует колебательный контур, присоединенный к высокочастотному генератору.

При изменении частоты генератора по резкому изменению амплитуды резонансной кривой на экране электронного осциллографа можно определить момент резонанса. Резонансная частота определяется с помощью частотомера или волномера. Этот метод применим для измерений на-

пряженности магнитного поля от 800 до  $16 \cdot 10^5$  А/м, точность его  $\pm 0,01\%$ .

На рассмотренном принципе работают приборы типа Е11-2, (ИМИ-2), выпускаемые отечественной промышленностью.

в) *Определение напряженности магнитного поля с использованием эффекта Холла*

Пластинка *A* (рис. 12-7) из полупроводникового материала (германий, сурьмистый индий и др.) расположена в постоянном магнитном поле перпендикулярно вектору напряженности поля *H*.

Если в пластинке будет проходить ток, направление которого перпендикулярно напряженности поля, то возникает э. д. с., направление которой перпендикулярно как вектору напряженности поля, так и направлению тока. Эта э. д. с., называемая э. д. с. Холла,

$$e_h = \frac{R_h}{d} i H,$$

откуда напряженность поля

$$H = e_h \frac{d}{R_h i}, \quad (12-17)$$

где  $R_h$  — постоянная Холла, зависящая от материала пластинки;

*d* — толщина пластинки.

Таким образом, измерив э. д. с. Холла, можно определить напряженность магнитного поля.

Зонды Холла применяются также для измерения других величин: больших токов, магнитной индукции. Отечественной промышленностью выпускается измеритель магнитной индукции Е11-3 (ИМИ-3) с датчиком Холла.

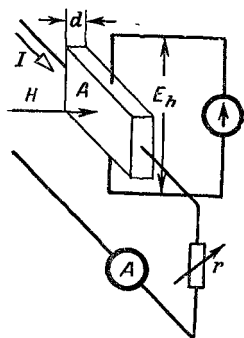


Рис. 12-7. Принцип определения напряженности магнитного поля с применением эффекта Холла.

#### 12-4. ПОЛУЧЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЦИКЛА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Основная кривая намагничивания и симметричная петля гистерезисного цикла (рис. 12-8) — кривые, характеризующие основные свойства ферромагнитного материала.

Получение этих кривых требует определения для различных значений напряженности поля соответствующих им значений магнитной индукции.

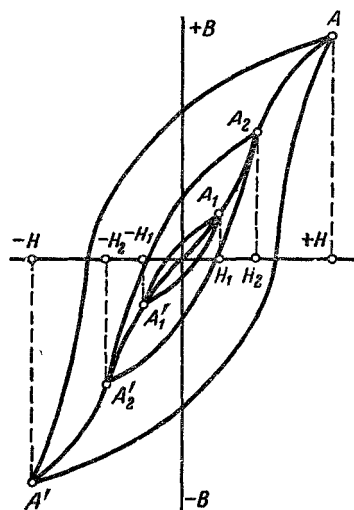


Рис. 12-8. Основная кривая намагничивания и петля гистерезисного цикла.

Концы стержневого образца необходимо замкнуть магнитно накоротко, т. е. замкнуть их магнитопроводом, который вместе с образцом составит замкнутую магнитную цепь с сопротивлением, практически равным магнитному сопротивлению образца. Такой магнитопровод с укрепленным на нем намагничивающей  $w_1$  и измерительной  $w_2$  обмотками называется пермеаметром.

Схема устройства одного из пермеаметров дана на рис. 12-9. Он представляет собой массивный стальной магнитопровод 1 прямоугольной или круглой формы. Через боковые отверстия вводится и укрепляется испытуемый стержневой образец 2. Магнитопровод из стали с большой магнитной проницаемостью имеет сечение в десятки раз больше сечения образца, вследствие чего сопротивление его значительно меньше сопротивления образца.

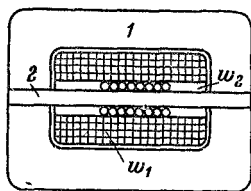


Рис. 12-9. Схема устройства пермеаметра.

Воздушный зазор между магнитопроводом и образцом увеличивает магнитное сопротивление цепи и является источником погрешностей. Для уменьшения этих погрешностей пользуются поправочными кривыми.

На рис. 12-10 дана схема соединения для получения основной кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла.

Перед получением кривой намагничивания определяется баллистическая постоянная гальванометра. Для этого,

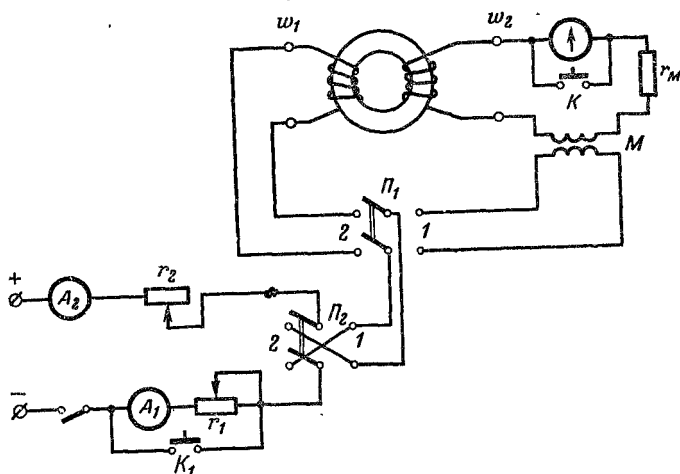


Рис. 12-10. Схема соединения для получения основной кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла.

поставив ножи переключателя  $\Pi_1$  в положение 1, кнопку  $K_1$  замыкают и получают цепь, изображенную на рис. 12-2. Процесс определения баллистической постоянной гальванометра изложен в § 12-2, б.

Перед испытанием образец размагничивается воздействием на него изменяющегося по направлению и уменьшающегося по величине магнитного поля. Для этого кнопки  $K$  и  $K_1$  замыкаются (рис. 12-10), ножи переключателя  $\Pi_1$  ставятся в положение 2, а ножи переключателя  $\Pi_2$  в произвольное положение 1 или 2. Установив реостатом  $r_2$  намагничивающий ток, соответствующий напряженности поля около 40 А/см, производят несколько (шесть—десять) переключений направления тока; затем несколько уменьшают ток и снова делают ряд переключений напра-

влений тока и так далее, уменьшая ток сначала до возможного минимума, а затем и до нуля.

*Получение основной кривой намагничивания.* Основной кривой намагничивания называют кривую, представляющую геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель. Для ее получения предварительно выбирают напряженности поля, при которых будут получены гистерезисные петли. Задавшись напряженностями поля, определяют соответствующие им намагничивающие токи, исходя из формулы

$$H = I_1 w / l. \quad (12-18)$$

При получении основной кривой намагничивания кнопки  $K$  и  $K_1$  замыкаются, ножи переключателя  $\Pi_1$  ставятся в положение 2, а  $\Pi_2$  — в положение 1.

Для получения первой петли с наименьшими значениями  $H_1$  и  $B_{m1}$ , вершина которой будет первой точкой  $A_1$  искомой кривой (рис. 12-8), устанавливают при помощи реостата  $r_2$  и амперметра  $A_2$  вычисленный намагничивающий ток. Сделав переключателем  $\Pi_2$  ряд переключений (шесть—десять), поставим ножи переключателя в положение 1. Такое многократное переключение намагничивающего тока приводит образец в состояние, определяемое симметричной гистерезисной петлей, и носит название магнитной подготовки образца. Таким образом, в нашем случае магнитное состояние образца будет характеризоваться точкой  $A_1$ , являющейся вершиной первой симметричной гистерезисной петли.

Разомкнув кнопку  $K$  и убедившись, что указатель гальванометра стоит на нуле, перебрасывают ножи переключателя из положения 1 в положение 2, отсчитывают при этом баллистический отброс гальванометра и замыкают кнопку  $K$ .

При этом переключении напряженность поля изменилась с  $+H_1$  на  $-H_1$ , а магнитная индукция — с  $+B_{m1}$  (точка  $A_1$ ) на  $-B_{m1}$  (точка  $A'_1$ ), т. е. магнитная индукция изменилась на  $2B_{m1}$ .

Магнитная индукция, соответствующая вершине первой гистерезисной петли [см. (12-9)]:

$$B_{m1} = \frac{C_{\Phi}}{2Sw} \alpha i.$$

Для получения второй, а затем и следующих точек

основной кривой намагничивания поступают аналогичным образом, т. е. устанавливают намагничивающий ток, выполнив магнитную подготовку, ставят ножи переключателя  $\Pi_2$  в положение 1. Разомкнув кнопку  $K$ , перебрасывают ножи переключателя  $\Pi_2$  из положения 1 в положение 2, отсчитывают баллистический отброс, замыкают кнопку  $K$  и определяют вершину второй гистерезисной петли (точка  $A_2$ ).

Так определяют все точки основной кривой намагничивания, включая точку  $A$  для наибольшей напряженности поля при данном испытании.

*Получение петли гистерезисного цикла.* Для получения точек симметричной гистерезисной петли выбираются произвольно напряженности магнитного поля и определяются соответствующие им намагничивающие токи по (12-18), при которых будет определяться магнитная индукция.

Для получения каждой из точек петли экспериментально определяется разность между максимальной индукцией  $B_m$  и магнитной индукцией, соответствующей выбранной напряженности поля.

Определение точек петли, расположенных на нисходящей части ее в первом квадранте (рис. 12-11), производится следующим образом.

Ножи переключателя  $\Pi_1$  ставятся в положение 2, переключателя  $\Pi_2$  — в положение 1. Кнопки  $K$  и  $K_1$  замкнуты.

Размыкая кнопку  $K_1$ , устанавливают реостатом  $r_1$  намагничивающий ток  $I_1$ , соответствующий напряженности поля  $H_1$ . Замкнув кнопку  $K_1$  переключателем  $\Pi_2$ , выполняют магнитную подготовку, после которой ножи переключателя  $\Pi_2$  ставят в положение 1. Разомкнув кнопку  $K$  и убедившись в том, что указатель гальванометра стоит на нуле шкалы, разомкнем кнопку  $K_1$ ; отметив баллистический отброс, замкнем кнопку  $K$ .

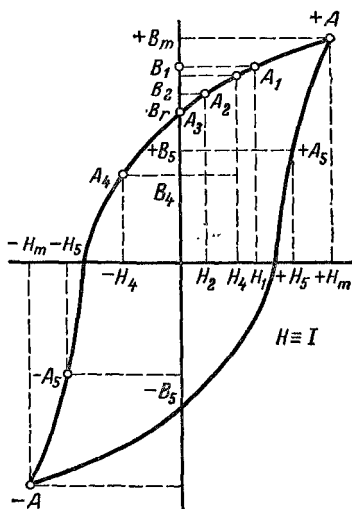


Рис. 12-11. Петля гистерезиса.

При размыкании кнопки  $K_1$  ток уменьшился с  $+I_m$  до  $I_1$ , напряженность поля — с  $+H_m$  до  $H_1$  и магнитная индукция с  $+B_m$  до  $B_1$ .

Если определить по баллистическому отбросу изменение магнитной индукции

$$\Delta B_1 = B_m - B_1 = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_1,$$

искомое значение магнитной индукции

$$B_1 = B_m - \Delta B_1 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_1. \quad (12-19)$$

Аналогично точке  $A_1$  ( $H_1$  и  $B_1$ ) на рис. 12-11 находятся и другие точки кривой, расположенные в первом квадранте.

При нахождении точки  $A_3$  (рис. 12-11), соответствующей остаточной индукции  $B_r$ , после магнитной подготовки и установки ножей переключателя  $\Pi_2$  в положение 1 размыкают кнопку  $K$  и, размыкая цепь намагничивающего тока переключателем  $\Pi_2$ , отмечают баллистический отброс и находят остаточную индукцию по формуле

$$B_r = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_r. \quad (12-20)$$

Определение точек гистерезисной петли, расположенных во II и III квадрантах (рис. 12-11), производится так же, как и точек, расположенных в I квадранте, с той лишь разницей, что вслед за магнитной подготовкой и размыканием кнопки  $K_1$  тотчас производится переключение ножей переключателя  $\Pi_2$  из положения 1 в положение 2. При этом намагничивающий ток изменится, например, от  $+I_m$  до  $+I_4$  и от  $+I_4$  до  $-I_4$ ; напряженность поля изменится от  $+H_m$  до  $+H_4$  и от  $+H_4$  до  $-H_4$ ; магнитная индукция — от  $+B_m$  до  $+B_4$  и от  $+B_4$  до  $B_4$  (точка  $A_4$  на рис. 12-11).

Определяемое по баллистическому отбросу изменение магнитной индукции

$$\Delta B = B_m - B_4 = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4,$$

а искомое значение магнитной индукции

$$B_4 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4.$$



Последняя точка  $A$  находится по отбросу гальванометра при переключении переключателя  $\Pi_2$  из положения 1 положение 2 после магнитной подготовки.

Изменение магнитной индукции

$$\Delta B = B_m - (-B_m) = 2B_m = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha,$$

искомое значение магнитной индукции

$$B_m = \frac{C_\Phi}{2S_w} \alpha. \quad (12-21)$$

Вторая половина гистерезисной петли строится по первой половине исходя из условий симметрии.

### 12-5. ФЕРРОМЕТР

Характеристики ферромагнитных материалов при переменном токе вследствие вихревых токов могут отличаться от характеристик тех же материалов, полученных при постоянном токе.

Феррометр позволяет получить основную кривую намагничивания и определить потери в стали при переменном токе.

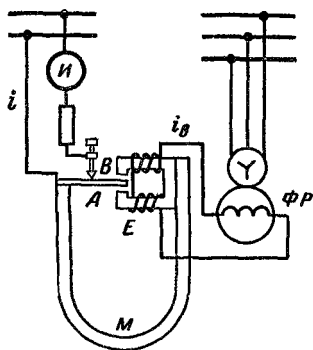


Рис. 12-12. Схема феррометра.

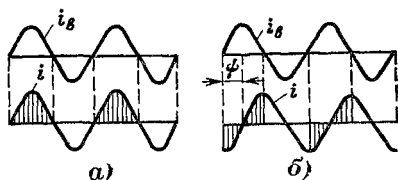


Рис. 12-13. Кривые токов в феррометре.

Он состоит из магнитоэлектрического измерителя  $I$ , фазорегулятора и вибрационного выпрямителя (рис. 12-12), состоящего из магнита  $M$ , электромагнита  $E$  и якоря-вибратора  $A$ .

Обмотка электромагнита присоединена к ротору фазорегулятора. Фаза тока  $i_B$  электромагнита может изменяться поворотом ротора. В течение одного полупериода тока возбуждения,  $i_B$  якорь замыкает цепь измерителя в точке  $B$ ; в течение второго полупериода цепь измерителя

разомкнута. Если ток  $i_B$  и ток измерителя  $i$  совпадают по фазе, то в течение каждого периода через измеритель будет проходить положительная полуволна тока (рис. 12-13, а) и показания измерителя будут пропорциональны среднему за полупериод значению измеряемого тока (напряжения).

Если токи  $i_B$  и  $i$  не совпадают по фазе, то через измеритель в течение каждого периода будет проходить часть положительной и часть отрицательной полуволны тока и показания измерителя будут пропорциональны произведению среднего значения измеряемого тока (напряжения) и косинуса угла  $\psi$  сдвига между токами  $i_B$  и  $i$ , т. е.

$$\alpha = kI_{\text{ср}} \cos \psi.$$

Например, при  $\psi = 90^\circ$  показание измерителя будет равно нулю (рис. 12-13, б), так как  $\alpha = kI_{\text{ср}} \cos \psi = kI_{\text{ср}} \cdot 0 = 0$ .

Измеритель градуируется в действующих значениях напряжения при синусоидальной форме кривой напряжения.

Образец стали для испытания имеет форму кольца сечением  $S$ , массой 50 г.

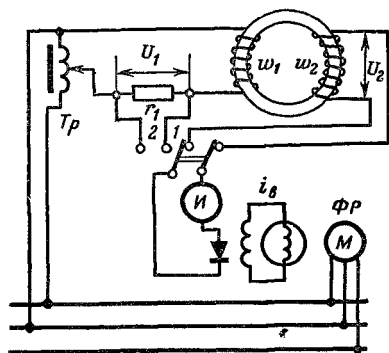


Рис. 12-14. Принципиальная схема соединения для испытания стали при помощи феррометра.

На него наматываются намагничивающая  $w_1$  и измерительная  $w_2$  обмотки (рис. 12-14).

При испытании измеритель подключают к обмотке  $w_2$ . Ротор фазорегулятора поворачивают до тех пор, пока измеритель не даст наибольшего показания, что соответствует совпадению по фазам токов  $i_B$  и  $i$  в цепи обмотки  $w_2$ . Прибор измерит напряжение  $U_2$  на зажимах обмотки  $w_2$ , которое можно выразить так:

$$U_2 = 4,44fw_2B_mS.$$

Отсюда значение магнитной индукции в образце

$$B_m = U_2 / (4,44fw_2S). \quad (12-22)$$

Определив напряжение  $U_2$ , не изменяя положения ротора фазорегулятора, включим прибор на зажимы сопротивления  $r_1$ . Напряжение  $U_1$  на зажимах этого безреактив-

ного резистора пропорционально току  $I$  намагничивающей обмотки  $w_1$ . В этом случае прибор измерит активную слагающую напряжения  $U_{1a} = r_1 I_1 \cos \varphi$ , так как между током  $i_B$  (имеющим ту же фазу, что и  $U_2$ ) и током измерителя (имеющим ту же фазу, что и ток в резисторе  $r_1$ ) будет угол сдвига  $\varphi$ . Зная активное сопротивление  $r_1$ , определим и активную слагающую намагничивающего тока:

$$I_a = I \cos \varphi = U_{1a}/r_1.$$

Переключив прибор на обмотку  $w_2$  поворотом ротора фазорегулятора, получим нулевое показание измерителя, что укажет на изменение фазы тока  $i_B$  на  $90^\circ$ . Теперь, переключив прибор на сопротивление  $r_1$ , измерим реактивную слагающую напряжения  $U_{1r} = r_1 I \sin \varphi$ , откуда реактивная слагающая намагничивающего тока

$$I_r = I \sin \varphi = U_{1r}/r_1.$$

Магнитное поле, созданное обмоткой  $w_1$ , имеет напряженность

$$H_m = \sqrt{2} I \sin \varphi w_1/l. \quad (12-23)$$

Магнитная проницаемость

$$\mu = B_m/H_m = B_m l/(\sqrt{2} \sin \varphi w_1), \quad (12-24)$$

где  $l$  — длина осевой линии образца.

Мощность потерь в образце на гистерезис и вихревые токи, отнесенная к единице массы стали,

$$P_{c.o} = U_2 I \cos \varphi \frac{w_1}{w_2} \frac{1}{G}, \quad (12-25)$$

где  $G$  — масса образца.

Проведя ряд подобных измерений при различных напряжениях на зажимах намагничивающей обмотки, определяют для различных напряженностей поля  $H$  соответствующие значения  $B$  и  $\mu$ , что позволяет построить кривые

$$B_m = f(H) \quad \text{и} \quad \mu = f(H).$$

Кроме того, определив удельные потери  $P_{c.o}$  при различных значениях  $B_m$ , строят кривую

$$P_{c.o} = f(B_m).$$

Феррометры типа У542, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют пределы измерения: напряжен-

ности поля 0,01—100 А/см, магнитной индукции от 0,05 Т до насыщения. Питание от сети переменного тока 127 или 220 В, частотой 50 Гц.

### 12-6. ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Одна из схем для получения магнитных характеристик с применением электронного осциллографа дана на рис. 12-15.

На кольцевой образец наложены две обмотки.

Намагничивающая обмотка  $w_1$  и безреактивный резистор  $r_1$  через автотрансформатор присоединены к сети.

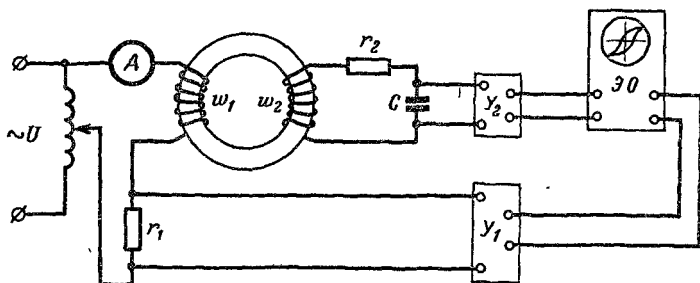


Рис. 12-15. Схема получения магнитных характеристик с применением электронного осциллографа.

Напряжение  $u_1 = i_1 r_1$  на резисторе  $r_1$  пропорционально намагничивающему току  $i_1$ , а следовательно, и напряженности поля в образце.

Измерительная обмотка  $w_2$  замкнута на конденсатор и большое сопротивление  $r_2$ .

Наведенная в измерительной обмотке э. д. с.

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = w_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (12-26)$$

Если сопротивление  $r_2$  велико по сравнению с остальной частью сопротивления цепи, то ток в измерительной цепи

$$i_2 = e_2 / r_2 = (w_2 S / r_2) \frac{dB}{dt}. \quad (12-27)$$

Напряжение на конденсаторе  $C$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \frac{w_2 S}{r_2} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{1}{C} \frac{w_2 S}{r_2} B \quad (12-28)$$

пропорционально магнитной индукции в образце.

Подведя через усилитель  $U_1$  к одной паре отклоняющих пластин осциллографа напряжение  $u$ , пропорциональное напряженности магнитного поля, а к другой паре пластин — усиленное усилителем  $U_2$  напряжение  $u_c$ , пропорциональное магнитной индукции в образце на экране осциллографа, получим гистерезисную петлю.

### 12-7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ ВАТТМЕТРОВЫМ МЕТОДОМ

За каждый период переменного тока сталь перемагничивается и в ней происходит потеря энергии на перемагничивание — потеря на гистерезис.

Изменение магнитного потока вызывает появление в стали э. д. с. и вихревых токов, что также связано с потерями энергии — потерями на вихревые токи.

Мощность потерь на гистерезис

$$P_r = \eta f B_m^n V, \quad (12-29)$$

где  $\eta$  — коэффициент гистерезиса;

$V$  — объем стали;

$n = 1,2 \div 2$  (в зависимости от магнитной индукции).

Мощность потерь на вихревые токи

$$P_v = \xi f^2 \Delta^2 B_m^3 V, \quad (12-30)$$

где  $\xi$  — коэффициент вихревых токов;

$\Delta$  — толщина листов стали.

Из написанного следует, что для данного сорта стали потери зависят от частоты тока и максимальной индукции.

Определение мощности потерь в стали ваттметровым методом, идея которого принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому, производится на аппарате для испытания стали.

Он состоит из четырех длинных (до 0,5 м) катушек, укрепленных на раме, и зажимов для крепления образцов стали. Каждая катушка имеет по две обмотки с одинаковым числом витков. Внутри катушек закладываются пакеты стали, образующие замкнутый магнитопровод. Пакеты набираются из полос листовой стали длиной 0,5 м, шириной 3 см. Половина полос нарезается вдоль проката листов, другая половина — в перпендикулярном направлении. Полосы изолируются друг от друга папиросной бумагой. Масса всех пакетов не менее 10 кг.

При включении цепи (рис. 12-16) на переменное напряжение ваттметр измерит мощность  $P$ , состоящую из:

- 1) мощности потерь в стали  $P_c = P_r + P_v$ ;
- 2) мощности потерь в вольтметре  $P_v = U^2/r_v$ ;
- 3) мощности потерь в цепи напряжения ваттметра  $P_U = U^2/r_U$ .

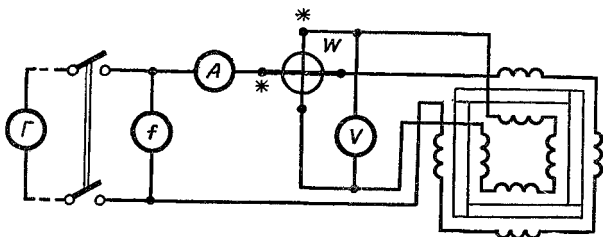


Рис. 12-16. Схема соединения для испытания стали ваттметровым методом.

Следовательно, измеренная ваттметром мощность

$$P = P_c + P_v + P_U,$$

откуда мощность потерь в стали

$$P_c = P - (P_v + P_U).$$

Разделив мощность потерь в стали на ее массу  $G$ , определим мощность потерь, отнесенную к единице массы стали:  $P_{c,0} = P_c/G$ . Так как мощность потерь в стали зависит от магнитной индукции, то последнюю необходимо знать при определении потерь.

Магнитная индукция

$$B_m = U/4,44fwS,$$

которая непосредственно вытекает из известной формулы

$$U = E = 4,44fwSB_m,$$

где  $U$  — напряжение, измеряемое вольтметром, приближенно равное э. д. с., наведенной в обмотке аппарата, так как падение напряжения в ней мало;

$S$  — сечение образца, определяемое по его массе и плотности материала.

## 12-8. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ

Установка рис. 12-16 для разделения потерь в стали должна питаться от источника, допускающего регулировку частоты от 20 до 60 Гц.

Определив мощность потерь в стали при постоянной индукции и разных частотах, построим кривую зависимости мощности потерь от частоты  $P_c = F(f)$  (рис. 12-17).

Как показано раньше, мощность потерь в стали

$$P_c = P_v + P_w = \eta f B_m^n V + \xi f^2 \Delta^2 B_m^2 V. \quad (12-31)$$

При постоянной магнитной индукции

$$P_c = P_v + P_w = \alpha f + \beta f^2, \quad (12-32)$$

где  $\alpha = \eta B_m^n V$  — мощность потерь на гистерезисе за один период;

$\beta f = \xi \Delta^2 B_m^2 V f$  — мощность потерь на вихревые токи за один период.

Мощность потерь в стали за один период

$$P'_c = P_c / f = \alpha + \beta f. \quad (12-33)$$

Разделив ординаты кривой  $P_c = F(f)$  при  $B_m = \text{const}$  (рис. 12-17) на соответствующую им частоту  $f$ , получим

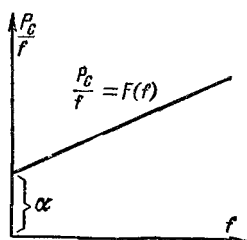


Рис. 12-18. Графический способ разделения мощности потерь в стали.

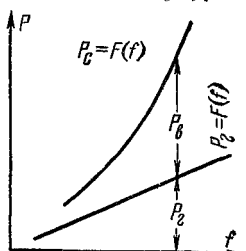


Рис. 12-19. Кривые мощности потерь в стали в зависимости от частоты.

значения ординат новой кривой (рис. 12-18) — кривой мощности потерь в стали за один период в зависимости от частоты  $P'_c = F(f)$ . Из уравнения (12-33) следует, что новая кривая является прямой линией, отсекающей на оси ординат отрезок, равный первому члену  $\alpha$  (12-33), т. е.

мощности потерь на гистерезис за один период. Умножая полученное графически значение  $\alpha$  на различную частоту, получаем мощность потерь на гистерезисе при различных частотах.

Вычитая из мощности потерь в стали мощность потерь на гистерезис при одной и той же магнитной индукции и при той же частоте, найдем мощность потерь на вихревые токи (рис. 12-19). Таким образом, возможно разделить потери в стали на потери от гистерезиса и потери на вихревые токи при постоянной индукции и разных значениях частоты.

Аналогичным образом можно произвести определение и разделение потерь в стали и для других значений магнитной индукции.

## *Г л а в а т р и н а д ц а т а я*

### **ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

#### **13-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ**

Соблюдение любого технологического процесса можно обеспечить только применением измерительной техники и автоматики. При этом приходится измерять большое число величин и главным образом неэлектрических.

В большинстве случаев оказывается целесообразным измерять неэлектрические величины электрическими методами, что объясняется возможностью измерения почти любых неэлектрических величин, непрерывностью процесса измерения, легкостью передачи результатов измерений на расстояние, высокой точностью и чувствительностью.

Измерение неэлектрических величин сводится к тому, что неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее электрическую, измеряя которую определяем и неэлектрическую величину. Элемент измерительного устройства, преобразующий входную неэлектрическую величину в выходную электрическую, называется измерительным преобразователем.

Если входная неэлектрическая величина преобразуется в один из электрических параметров  $r$ ,  $L$  или  $C$ , для измерения которых необходимо применение источника питания, то преобразователь называется п а р а м е т р и -



ч е с к и м, если неэлектрическая величина преобразуется в э. д.-с., то преобразователь г е н е р а т о р н ы й.

Параметрические преобразователи по принципу действия делят на следующие группы:

1. *Реостатные преобразователи.* Работа этих преобразователей основана на изменении сопротивления реостата в зависимости от измеряемой неэлектрической величины; последняя часто используется для перемещения движка реостата. Эти преобразователи используются для измерения объема и уровня жидкостей, для измерения перемещения деталей и т. п.

2. *Преобразователи контактного сопротивления.* Их работа основана на изменении контактного сопротивления в зависимости от измеряемой величины, например давления, деформации и т. п.

3. *Проволочные преобразователи.* Изменение сопротивления проволоки при ее деформации используется для измерения давления, деформации и т. п.

4. *Преобразователи термосопротивления.* Используется зависимость сопротивления провода как от температуры, так и от ряда физических величин, определяющих окружающую среду. Эти преобразователи применяются для измерения температур, скорости движения газов или для определения состава газов и др.

5. *Электролитические преобразователи.* Работа их основана на зависимости электрического сопротивления раствора электролита от его концентрации и используется для измерения этой концентрации и для количественного анализа жидкостей и газов, растворимых в жидкости.

6. *Магнитоупругие преобразователи.* Зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника преобразователя, а следовательно, и индуктивного сопротивления преобразователя от механических напряжений, действующих на сердечник, используется для измерения механических величин.

7. *Индуктивные преобразователи.* Зависимость индуктивности преобразователя от изменения положения одной из его частей под действием силы, давления или линейного перемещения используется для измерения этих величин.

8. *Емкостные преобразователи.* Изменение емкости преобразователя под действием силы, давления, линейного перемещения, угла поворота, количества вещества, содержания влаги используется для измерения этих величин.

9. *Фотоэлектрические преобразователи.* Получение фототока, определяемого световым потоком, который зависит от измеряемой неэлектрической величины, или получение импульсов фототока, частота которых зависит от измеряемой величины, используется для измерения линейных размеров, температуры, прозрачности и мутности жидкости и газовой среды.

10. *Ионизационные преобразователи.* Зависимость ионизационного тока от ряда факторов используется для анализа газа и определения его плотности, геометрических размеров изделий и т. п.

Генераторные преобразователи по принципу действия делят на следующие группы:

1) *индукционные преобразователи.* Преобразование измеряемой неэлектрической величины в индуктированную э. д. с. используется для измерения скорости, линейных или угловых перемещений;

2) *термоэлектрические преобразователи.* Возникновение термо-э. д. с. в цепи преобразования и зависимость ее от температуры используются для ее измерения;

3) *пьезоэлектрические преобразователи.* Пьезоэлектрический эффект, т. е. возникновение э. д. с. в некоторых кристаллах под действием механических сил, используется для измерения этих сил, давлений и геометрических размеров изделий.

Устройство для измерения неэлектрических величин электрическим путем в простейшем случае состоит из преобразователя, соединительных проводов и измерительного прибора — измерителя, на шкале которого обычно наносятся значения измеряемой неэлектрической величины. В большинстве случаев измерительные устройства усложняются применением мостовых или компенсационных схем, источников питания, стабилизаторов, выпрямителей, усилителей, электрических фильтров и т. п.

Рассмотрим принцип работы и упрощенные схемы некоторых наиболее распространенных измерительных преобразователей.

## 13-2. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### а) *Реостатные преобразователи*

Реостатный преобразователь представляет собой реостат (рис. 13-1), движок  $\delta$  которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины  $x$ , так

что сопротивление реостата  $r$  зависит от величины  $x$ ;  $r = f(x)$ . Измерив  $r$ , можно найти  $x$ .

В схемах рис. 13-2, а и б с реостатным преобразователем использованы однорамочные магнитоэлектрические измерители И, а в схеме рис. 13-2, в применен двухрамочный логометр.

Пример применения реостатного преобразователя для измерения уровня или объе-

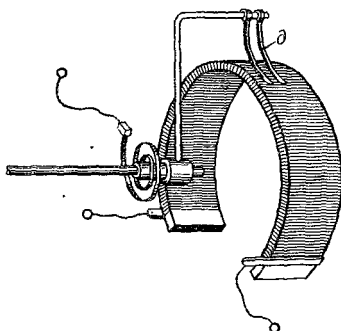


Рис. 13-1. Реостатный преобразователь.

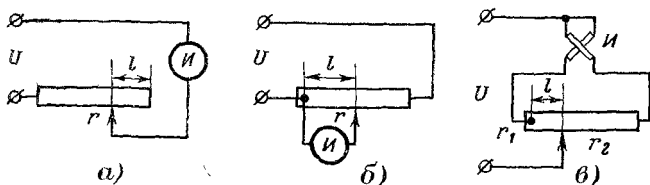


Рис. 13-2. Схемы с реостатным преобразователем.

ма жидкости показан на рис. 13-3. Изменение положения поплавка, определяемого уровнем или объемом жидкости, вызывает изменение сопротивлений резисторов  $r_1$  и  $r_2$ , включенных последовательно с катушками 1 и 2 логометра. В результате изменяются отношение токов в катушках и показание прибора. Шкала прибора градуируется в значениях измеряемой величины объема или уровня жидкости.

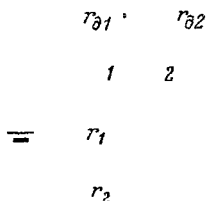


Рис. 13-3. Схема уровнемера.

### б) Преобразователи контактного сопротивления

Столбик из 10—15 угольных шайб (диаметром 0,5—1 см), на концах которого расположены латунные диски с выводами для включения в измерительную цепь, зажат

между двумя винтами *a* и *b* (рис. 13-4), изолированными от столбика слюдяными прокладками.

Электрическое сопротивление столбика зависит от его сжатия, так как при этом изменяется переходное сопротивление между шайбами. Таким образом, по изменению электрического сопротивления столбика можно определить механическую силу *P*, действующую на винт *b*.

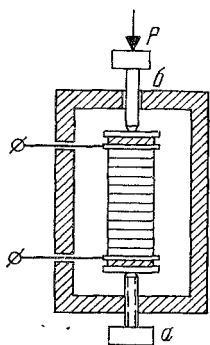


Рис. 13-4. Преобразователь с угольными шайбами.

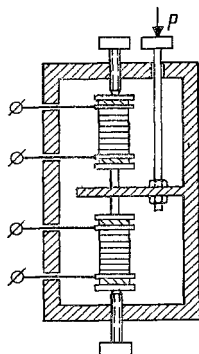


Рис. 13-5. Дифференциальный преобразователь с угольными шайбами.

Если применить дифференциальный преобразователь с двумя столбиками (рис. 13-5), включенными в два смежных плеча моста, то получим: 1) при действии измеряемой силы *P* увеличение сжатия одного и уменьшение сжатия другого столбика вызовут увеличение отношения их сопротивлений, т. е. увеличение отношения двух плеч моста, что приводит к повышению точности измерения; 2) при таком включении столбиков изменение температуры, вызывающее одинаковое изменение их сопротивлений, не влияет на показание измерителя, что также приводит к повышению точности измерения.

### в) Проволочные преобразователи

Эти преобразователи изготавливаются из тонкой проволоки (диаметром 0,02—0,04 мм), концы которой привариваются к медным выводам (рис. 13-6). Проволока закрепляется специальным клеем между двумя листочками тонкой бумаги площадью 0,1—10 см<sup>2</sup>.

Преобразователь приклеивается на поверхность испытуемой детали или конструкции и воспринимает ее деформацию, при этом изменяются размеры, удельное сопротивление материала и сопротивление преобразователя. По относительному изменению сопротивления преобразователя можно определить механические напряжения, возникающие в детали или конструкции.

Для преобразователей применяется проволока из константана, нихрома или железо-хромо-алюминиевого сплава — материалов, обладающих большой относительной чувствительностью  $k = \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l}$ , малым температурным коэффициентом сопротивления и большим удельным электрическим сопротивлением.

Сопротивление преобразователя — несколько сотен ом, а относительное изменение сопротивления — десятые доли процента.

Для устранения влияния температуры применяют два одинаковых преобразователя: один «рабочий», другой — «нерабочий», которые включаются в два смежных плеча измерительного моста. Рабочий преобразователь наклеивается на поверхность испытуемой детали, а нерабочий — на поверхность из такого же металла, что и испытуемая деталь.

Проволочные преобразователи являются разовыми, т. е. наклеиваются только 1 раз.

Партия преобразователей, изготовленная из одной и той же проволоки, при одинаковом электрическом сопротивлении и одинаковой технологии обладает характеристиками  $r = f(\Delta l/l)$ , совпадающими с погрешностью до 1%. Это дает возможность, получив указанную характеристику для одного из преобразователей данной партии, применять ее и для остальных преобразователей этой партии.

### г) Терморезисторы (термосопротивления)

Прохождение электрического тока по проводу сопровождается выделением тепла, которое частично идет на нагревание провода, частично отдается в окружающую среду конвекцией, теплопроводностью и излучением.

При установившемся тепловом равновесии температура провода и его сопротивление зависят от тока в проводе и

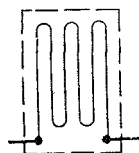


Рис. 13-6. Схема проволочного преобразователя.

от причин, влияющих на отдачу тепла в окружающую среду. К ним относятся размеры провода, его конфигурация и арматура, температуры провода и среды, скорость движения среды, ее состав, плотность и др.

Указанные зависимости используются для измерения температуры, скорости, плотности и состава газовой среды по сопротивлению провода. Провод, предназначенный для указанной цели, является измерительным преобразователем и носит название терморезистора.

При применении терморезистора необходимо создать условия, в которых измеряемая неэлектрическая величина оказывает наибольшее влияние на сопротивление терморезистора, а остальные величины, наоборот, по возможности не влияют на него.

Следует стремиться к уменьшению теплоотдачи, возникающей благодаря теплопроводности выводных зажимов проводов и лучеиспусканию. При длине провода, в 500 или большее число раз превосходящей его диаметр, отдачей через теплопроводность выводных зажимов провода можно пренебречь. Отдачей тепла излучением можно пренебречь, если разность температур провода и среды не превышает  $100^{\circ}\text{C}$ .

Рассмотрим газоанализаторы, в которых терморезисторы применяются для определения содержания газа в газовой смеси. Смесь из двух газов, не вступающих друг с другом в химическую реакцию, имеет теплопроводность, равную средней арифметической из теплопроводностей составляющих, т. е.

$$\lambda_{12} = (\lambda_1 a + \lambda_2 b)/100,$$

где  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  — теплопроводности смеси и ее составляющих;

$a$  и  $b$  — процентное содержание составляющих газовой смеси.

Приняв во внимание, что  $b = 100 - a$ , можем написать:

$$\lambda_{12} = [\lambda_1 a + \lambda_2 (100 - a)]/100,$$

откуда

$$a = 100 (\lambda_{12} - \lambda_2)/(\lambda_1 - \lambda_2).$$

Измерив теплопроводность смеси  $\lambda_{12}$  и зная теплопроводности  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , можно определить процентное содержание одной из составляющих газовой смеси. При этом необходимо, чтобы температура терморезистора, а следова-

тельно, и его сопротивление при прохождении по нему тока  $I = \text{const}$  зависели только от теплопроводности смеси  $\lambda_{12}$ , т. е. чтобы

$$r = f(\lambda_{12}) \quad \text{или} \quad r = f_1(a).$$

Газоанализатор углекислого газа (рис. 13-7) имеет два одинаковых терморезистора:  $r_1$  и  $r_2$ , включенных в два смежных плеча моста. Первое, рабочее находится в камере, в которой проходит газовая смесь, второе, нерабочее расположено в камере с воздухом. На шкале измери-

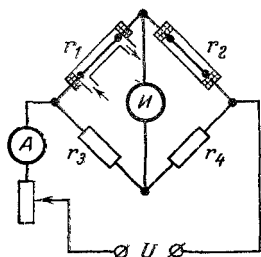


Рис. 13-7. Схема газоанализатора.

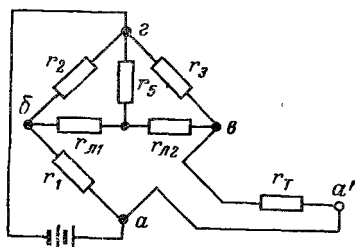


Рис. 13-8. Схема моста с логометром термометра сопротивления.

теля  $I$  нанесены деления, дающие значения содержания  $\text{CO}_2$ .

В термометрах сопротивления терморезисторы применяются для измерения температур. Они изготавливаются обычно из проволоки, материал которой должен обладать большим температурным коэффициентом сопротивления: платина (до  $500^\circ\text{C}$ ), никель (до  $300^\circ\text{C}$ ), медь (до  $150^\circ\text{C}$ ). Проволоку наматывают на каркас из пластмассы или слюды и помещают в защитную оболочку, размеры и форма которой определяются назначением термометра.

Сопротивление термометра обычно 50 или 100 Ом. По сопротивлению преобразователя определяют его температуру, а следовательно, и температуру окружающей его среды.

Для измерений часто применяют схему неуравновешенного моста с магнитоэлектрическим логометром (рис. 13-8). Три плеча моста  $r_1, r_2, r_3$  выполнены из манганина, четвертое  $r_т$  — терморезистор. Две рамки логометра ( $r_{л1}$  и  $r_{л2}$ ) включены в диагональ моста. Общая точка их через сопротивление  $r_5$  соединена с вершиной моста  $г$ .

При равновесии моста ( $r_2 = r_3$ ,  $r_1 = r_T$ ,  $r_{Л1} = r_{Л2}$ ), когда потенциалы точек  $b$  и  $e$  одинаковы, в рамках логометра идут одинаковые токи встречного направления. При нарушении равновесия токи в рамках логометра изменяются. Их приращения  $\Delta I_{Л1}$  и  $\Delta I_{Л2}$  не равны и имеют противоположные знаки, это вызывает поворот стрелки логометра. Угол поворота

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{I_{Л1} + \Delta I_{Л1}}{I_{Л2} + \Delta I_{Л2}}\right) = f_1(r_T) = f_2(t).$$

Изменение сопротивления проводов, соединяющих терморезистор с мостом, вызванное изменением температуры окружающей среды, вызывает погрешность в измерении температуры.

Для устранения этой погрешности одна из вершин диагонали питания моста переносится непосредственно к терморезистору (точка  $a'$  на рис. 13-8). Вследствие этого сопротивление одного соединительного провода входит в плечо моста  $r_1$ , а сопротивление второго соединительного провода — в плечо моста  $r_T$ , следовательно, изменение сопротивлений соединительных проводов не влияет на условия равновесия моста ( $r_1 r_3 = r_2 r_T$ ), а при отсутствии равновесия оно значительно меньше влияет на токи в катушках логометра.

Большой интерес для измерения температур представляют объемные полупроводниковые резисторы с температурным коэффициентом сопротивления, примерно в 10 раз большим, чем у металлов (от  $-0,03$  до  $-0,05$   $1/^\circ\text{C}$ ).

Полупроводниковые терморезисторы (типа ММТ) изготавливаются керамическими методами из различных окислов, например  $\text{ZnO}$ , и сернистых соединений, например  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Они имеют сопротивление 1 000—20 000 Ом и могут применяться для измерения температур от  $-100$  до  $+120$   $^\circ\text{C}$ . Эти сопротивления имеют форму стержней или пластин и обладают малыми размерами. Характеристики их  $r = f(t)$  не строго постоянны. Полупроводниковые терморезисторы не обладают взаимозаменяемостью и не получили массового распространения в термометрах сопротивления.

#### д) Электролитические преобразователи

Концентрацию электролита можно определить по его сопротивлению  $r_x$ , так как удельная электрическая проводимость электролита зависит от его концентрации.



Измерительный электролитический преобразователь представляет собой сосуд с испытуемым электролитом и двумя электродами (рис. 13-9).

Во избежание электролиза измерение сопротивления электролита производится на переменном токе. Для устранения влияния температуры применяется температурная компенсация. Один из термокомпенсаторов показан на рис. 13-9. Он представляет собой медно-никелевый резистор  $r_k$ , расположенный в растворе. Он соединен последовательно с разветвлением из сопротивления электролита  $r_x$  и шунтирующего манганинового резистора  $r_1$ . Сопротивления  $r_k$  и  $r_1$  подобраны так, что изменение сопротивления электролита, вызванное изменением его температуры, с погрешностью до 1—2% компенсируется изменением сопротивления резистора  $r_k$ .

Измеряемое сопротивление  $r_x$  находится по сопротивлению  $r_{аб}$  между точками  $a$  и  $b$  схемы, которое определяется обычно при помощи неуравновешенного измерительного моста, в одно из плеч которого включаются зажимы  $a$  и  $b$  электролитического преобразователя. Мост питается через стабилизатор от сети переменного тока. На выходе моста включается выпрямительный миллиамперметр, шкала которого проградуирована в значениях концентрации раствора электролита.

Электролитические преобразователи получили широкое применение для автоматического контроля производственных процессов в пищевой, химической, текстильной промышленности, а также для измерения концентрации солей в воде для питания котлов.

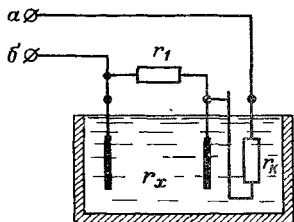


Рис. 13-9. Схема электролитического преобразователя.

### е) Индуктивные преобразователи

Индуктивный преобразователь (рис. 13-10, а) — это электромагнит, якорь которого перемещается под действием измеряемой механической величины  $P$ : силы, давления, линейного перемещения. Изменение положения якоря изменяет воздушный зазор  $\delta$ , а следовательно,

индуктивность катушки электромагнита и ее полное сопротивление, т. е.

$$z = f(P).$$

В дифференциальном преобразователе (рис. 13-10, б) перемещение якоря вызывает увеличение индуктивности одной катушки и уменьшение индуктивности другой, что

повышает чувствительность преобразователя. Включение двух катушек в смежные плечи измерительного моста дает температурную компенсацию.

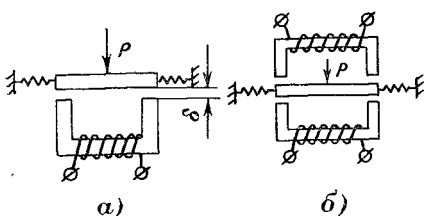
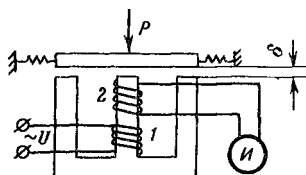


Рис. 13-10. Схемы индуктивного преобразователя (а) и индуктивного дифференциального преобразователя (б).

ным действующим значением. Под действием измеряемой механической величины  $P$  изменяется воздушный зазор  $\delta$ , магнитное сопротивление цепи, а следовательно, и магнитный поток, пронизывающий вторичную обмотку 2, к зажимам которой присоединен вольт-

Рис. 13-11. Схема индуктивного преобразователя трансформаторного типа.



метр. Таким образом, вторичная индуцированная э. д. с. и показания вольтметра зависят от измеряемой величины, т. е.

$$E \approx U_2 = f(P).$$

### ж) Емкостные преобразователи

Емкостный преобразователь представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется под действием измеряемой неэлектрической величины.

Так как емкость конденсатора зависит от площади электродов, их формы, расстояния между ними, а также от размеров диэлектрика и его диэлектрической прони-

цаемости, то эти преобразователи можно применять для измерения тех неэлектрических величин, значения которых влияют на один из перечисленных выше параметров емкостного преобразователя.

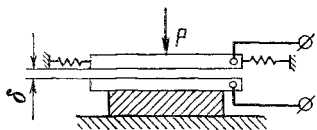


Рис. 13-12. Принцип работы емкостного динамометра и манометра.

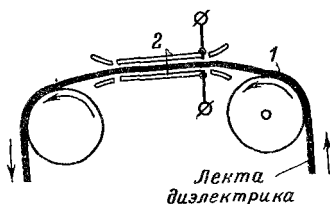


Рис. 13-13. Схема устройства емкостного преобразователя для измерения толщины.

В емкостных манометрах и динамометрах изменяется воздушный зазор  $\delta$  (рис. 13-12) между двумя пластинами конденсатора под действием измеряемого давления  $P$  или силы  $F$ .

Работа емкостного преобразователя для измерения толщины резиновой ленты  $1$ , которая протягивается между двумя неподвижными электродами  $2$  (рис. 13-13), основана на влиянии толщины ленты на изменение воздушного зазора и емкость преобразователя.

Емкостный преобразователь для измерения влажности зерна, порошка, волокна, пряжи представляет собой цилиндрический конденсатор (рис. 13-14). Внутренний электрод имеет форму цилиндрического стержня, наружный электрод — форму стакана, внутреннее пространство до определенного уровня заполняется испытуемым материалом. Содержание влаги в испытуемом материале резко увеличивает емкость вследствие большой диэлектрической проницаемости воды ( $\epsilon = 80$ ).

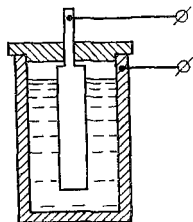


Рис. 13-14. Принцип устройства емкостного преобразователя влагометра.

Емкостные преобразователи имеют малую емкость, поэтому измерение их емкости производят при повышенной или высокой частоте, применяя при этом электронные усилители.

Чувствительным элементом фотоэлектрических преобразователей служат фотоэлементы с внешним и внутренним фотоэффектом. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом в свою очередь делятся на фотоэлементы вентильные (с запирающим слоем) и фоторезисторы (фотосопротивления).

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом бывают вакуумными и газонаполненными. Наложенный на внутреннюю поверхность стеклянной колбы слой серебра, покрытый слоем щелочного металла, служит катодом. Анод выполнен в виде металлического кольца или диска, расположенного в центре колбы (А на рис. 13-15). Если между анодом и катодом создать электрическое поле (рис. 13-15), а на фотоэлемент направить световой

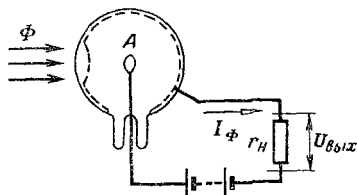


Рис. 13-15. Схема включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

элемент направить световой поток так, чтобы он падал на катод, то часть электронов катода, получив дополнительную энергию от светового потока, будет покидать катод, двигаясь к аноду, и в цепи установится электрический ток — фототок. Фототок прекратится, если прекратить освещение фотоэлемента.

При постоянном напряжении между анодом и катодом фототок пропорционален световому потоку.

Отношение фототока, выраженного в микроамперах, к световому потоку от стандартного источника света (лампа накаливания 100 Вт с вольфрамовой нитью и цветовой температурой 2850 К), выраженному в люменах (лм), называется интегральной чувствительностью фотоэлемента. Для вакуумных фотоэлементов она доходит до 100 мкА/лм.

В газонаполненных фотоэлементах колба заполняется обычно аргоном, что значительно повышает чувствительность фотоэлемента. Наиболее распространенные фотоэлементы: тип СЦВ — сурьмяно-цезиевый — вакуумный и тип ЦГ — кислородно-цезиевый — газонаполненный.

Фототок, полученный от вакуумных фотоэлементов, мал, и его приходится усиливать.

Вместо фотоэлементов можно применять фотоэлектронные умножители, в которых усиление фототока происходит

посредством вторичной эмиссии электронов эмиттерами, находящимися в самом умножителе. В результате вторичной эмиссии фототок увеличивается в сотни раз. Так например, в однокаскадном умножителе типа ФЭУ-1 интегральная чувствительность доходит до 800 мкА/лм.

Фотоэлементы с запирающим слоем по своему устройству сходны с полупроводниковыми выпрямителями, у которых между двумя слоями полупроводника есть запирающий слой. Попадая на эти фотоэлементы, световой поток способствует перераспределению электронов и дырок, что вызывает разность потенциалов на *p-n*-переходе.

Вентильный фотоэлемент (рис. 13-16) состоит из металлического диска, на который наложен слой полупроводника (селен, таллий, германий, кремний), а на последний наложен полупрозрачный металлический слой. При освещении в цепи возникает фототок.

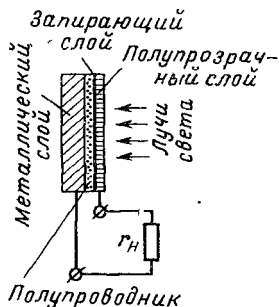


Рис. 13-16. Схема включения фотоэлемента с запирающим слоем.

Интегральная чувствительность фотоэлементов с запирающим слоем значительно выше, чем фотоэлементов с внешним фотоэффектом, что в ряде случаев дает возможность обойтись без применения усилителей.

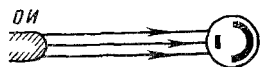


Рис. 13-17. Схема работы фотоэлектрического пирометра.

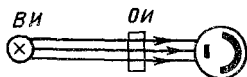


Рис. 13-18. Схема работы фотоэлектрических колориметров.

Фоторезисторы представляют собой полупроводниковые кристаллические или пленочные сопротивления, удельная проводимость которых резко возрастает с увеличением падающего на них светового потока.

Фотоэлектрические преобразователи применяются для измерения ряда неэлектрических величин.

Принцип работы фотоэлектрического пирометра — прибора для измерения температур, основанного на применении фотоэлемента, показан на рис. 13-17.

Световой поток достаточно нагретого тела — объекта измерения *ОИ*, воздействуя на фотоэлемент, вызывает в цепи фотоэлемента фототок, который зависит от светового потока, следовательно, и от температуры объекта измерения. По фототоку судят о температуре тела.

Рисунок 13-18 иллюстрирует принцип работы фотоэлектрических калориметров и дымномеров — приборов для определения прозрачности или состава жидкости или газа (дыма).

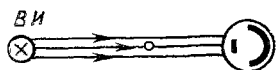


Рис. 13-19. Принцип работы фотоэлектрического прибора для измерения диаметра проволоки.

Световой поток, создаваемый вспомогательным источником *ВИ*, попадает в фотоэлемент, пройдя через *ОИ*, в котором частично поглощается. Степень поглощения, а следовательно, и интенсивность светового потока, воздействующего на фотоэлемент, зависит от измеряемого параметра. По фототоку, зависящему от интенсивности светового потока, воздействующего на фотоэлемент, и судят о значении измеряемой величины.

Принцип работы фотоэлектрического прибора для измерения линейных размеров изделия, например диаметра проволоки (рис. 13-19), заключается в том, что на пути светового потока, идущего от *ВИ* к фотоэлементу, помещается *ОИ*, экранирующий часть светового потока. Степень экранирования, а следовательно, и ток фотоэлемента определяются размерами измеряемого объекта.

Аналогичная схема применяется для счета изделий,двигающихся по конвейеру. В этом случае при прохождении изделия прерывается световой поток, идущий от источника света, и прерывается ток в цепи фотоэлемента. Число перерывов тока равно числу прошедших по конвейеру изделий.

### 13-3. ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

#### а) Индукционные преобразователи

Индукционный тахометр (рис. 13-20) представляет собой миниатюрный генератор, якорь которого вращается между полюсами постоянного магнита и, следовательно, э. д. с. которого пропорциональна скорости вращения якоря. Этот якорь механически связан с валом машины,

частота вращения которой измеряется, поэтому показание вольтметра, соединенного с зажимами якоря, пропорционально измеряемой частоте вращения.

Индукционный тахометр с вращающимся магнитом (рис. 13-21) состоит из постоянного магнита  $NS$ , механически связанного с валом машины, частота вращения

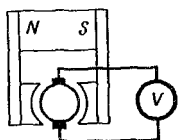


Рис. 13-20. Схема индукционного тахометра.

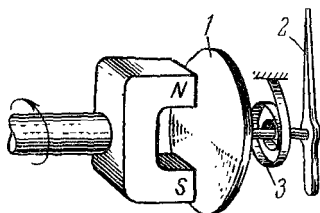


Рис. 13-21. Устройство тахометра с вращающимся полем.

которой измеряется, и алюминиевого диска  $I$ , расположенного перед полюсами магнита. Диск укреплен на одной оси с указательной стрелкой  $2$ . При вращении постоянного магнита в диске индуцируются э. д. с. и вихревые токи.

Взаимодействие вихревых токов с полем магнита создает вращающий момент, вызывающий поворот диска на угол, при котором этот момент уравновешивается моментом пружины  $3$ . Каждой частоте вращения соответствует определенный угол поворота подвижной части тахометра.

### б) Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрический эффект, используемый в преобразователях, заключается в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (кварц) под действием механических напряжений или деформаций.

Измеряемое давление  $P$  действует на дно корпуса преобразователя (рис. 13-22), являющееся мембраной. Две пластинки кварца зажаты между тремя металличе-

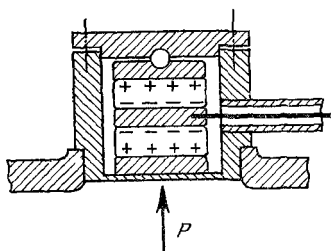


Рис. 13-22. Пьезоэлектрический преобразователь (кварцевый) для измерения давления газа.

скими прокладками. Между верхней прокладкой и крышкой корпуса расположен шарик, обеспечивающий равномерность распределения измеряемого давления. К средней прокладке — отрицательному электроду присоединен провод, изолированный от корпуса втулкой.

Разность потенциалов между отрицательным электродом и корпусом пропорциональна давлению  $P$ , которое и определяют по разности потенциалов.

Заряды при снятии давления исчезают, поэтому необходима хорошая изоляция отрицательного электрода.

Отрицательный электрод соединяется с сеткой первой лампы усилителя, на выходе которого включается измерительный механизм.

### в) Термоэлектрические преобразователи

Сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с термоэлектрическим преобразователем — термопарой (рис. 13-23), предназначенное для измерения температуры, называется термоэлектрическим пирометром.

Нагревание рабочего конца  $a$  термопары вызывает термо-э. д. с. и ток в цепи измерительного механизма, по отклонению подвижной части которого и определяется температура. Провода термопары должны быть достаточно длинными, чтобы их свободные концы  $b$  находились в среде с температурой, при которой градуировался пирометр. При измерении невысоких температур влияние температуры свободных концов термопары может быть очень большим. Для устранения этого влияния свободные концы помещают в термостат с постоянной температурой.

Рис. 13-23. Схема термоэлектрического пирометра.

Для термопар применяют следующие пары материалов: медь — константан (до  $300^{\circ}\text{C}$ ), медь — копель (до  $600^{\circ}\text{C}$ ), железо — копель (до  $800^{\circ}\text{C}$ ), хромель — копель (до  $800^{\circ}\text{C}$ ), хромель — алюмель (до  $1300^{\circ}\text{C}$ ), платина — платинородий (до  $1600^{\circ}\text{C}$ ).

Для защиты от механических повреждений и действия газов термопары помещают в защитные трубки из латуни, стали, фарфора или других материалов.



## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## А. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Для выполнения лабораторной работы необходима предварительная подготовка. Она состоит в ознакомлении с содержанием работы; в выяснении цели и задачи, поставленных в работе; в ознакомлении с приборами и аппаратами, необходимыми для выполнения работы, со схемой их соединения и с последовательностью выполнения всех операций.

В тетради для лабораторных работ должны быть записаны результаты подготовки, содержащие план работы, перечень аппаратуры, электрические схемы, формулы, расчеты, таблицы и т. п.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1. Ознакомиться с имеющейся аппаратурой и записать ее основные технические данные.
2. Приблизительно (с погрешностью до  $\pm 10\%$ ) рассчитать максимальные и минимальные возможные токи и напряжения на всех участках цепи и по полученным данным проверить возможность применения имеющейся аппаратуры.
3. Составить план расположения аппаратуры на рабочем столе. При этом необходимо аппаратуру расположить так, чтобы: а) схема соединения получилась простой и наглядной; б) работа с ней была удобной и не требовала лишних движений и неудобных положений наблюдателя; в) приборы, чувствительные к влиянию внешних полей, имели наименьшие дополнительные погрешности от магнитных полей.
4. Перед сборкой схемы следует ознакомиться с электрическими схемами самих приборов и аппаратов и со схемами их включения. При этом необходимо выяснить, какие зажимы приборов и аппаратов соответствуют отдельным точкам схем и в каких положениях должны находиться движки реостатов и рукоятки других регулирующих устройств.
5. При сборке схемы длина проводов должна соответствовать расстоянию между соединяемыми зажимами, а сечение проводов — соответствовать их нагрузке, при этом ради упрощения следует сначала соединить главную последовательную цепь, начав сборку ее с одного зажима источника питания и закончить на другом его зажиме, а затем соединять параллельные ветви.
6. После сборки схемы она должна быть проверена членами бригады. Проверка производится путем обхода сначала главного контура цепи, а затем всех параллельных ветвей. При сложных схемах производят дополнительную проверку всех узлов схемы. В заключение проверяют натяг всех зажимов, правильность установки движков всех регулирующих устройств и нулевые положения стрелок измерительных приборов.
7. Включение схемы под напряжение допускается только с разрешения руководителя работ после проверки им схемы соединения.

При включении цепи под напряжение включающий должен очень внимательно следить за поведением амперметров и других приборов. Если при этом будет замечено ненормально быстрое движение стрелки амперметра к концу шкалы, указывающее на большой ток в цепи, то нужно немедленно разомкнуть рубильник и сообщить об этом руководителю работ.

После замыкания рубильника рекомендуется сначала убедиться в возможности получения всех нужных режимов работы цепи (без записей наблюдений) и только после этого вторично получить все нужные режимы работы, записывая наблюдения в тетрадь лабораторных работ.

Отсчеты по приборам необходимо производить внимательно и аккуратно, записывая их в момент производства отсчета или непосредственно после отсчета, но до изменения режима работы цепи.

После окончания наблюдений, записей и контрольных расчетов они показываются руководителю работ, который дает разрешение на окончание работы или указания о дополнительных наблюдениях.

После разборки схемы инвентарь работы сдается руководителю. При этом зажимы у всех приборов должны быть подвернуты, соединительные провода аккуратно собраны и повешены на свои места.

Выполнение каждой лабораторной работы сопровождается записью, которая начинается в процессе предварительной (домашней) подготовки и производится в тетради для лабораторных работ.

Записи в тетради для лабораторных работ должны вестись аккуратно. Они должны быть оформлены так, чтобы из них можно было получить все необходимые данные, относящиеся к работе.

Рабочая запись должна содержать:

I. Наименование работы, ее номер и дату выполнения.

II. Перечень аппаратуры и ее технические данные, например:

1. Амперметр магнитоэлектрической системы  $I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$ , класс точности 1,5, № 87086.

2. Вольтметр магнитоэлектрической системы,  $U_{\text{ном}} = 15 \text{ В}$ , класс точности 1,5, № 98652.

3. Реостат с плавной регулировкой  $I_{\text{ном}} = 3,0 \text{ А}$ ,  $r_{\text{ном}} = 30 \text{ Ом}$ .

4. Аккумулятор свинцовый,  $E = 4 \text{ В}$ ,  $I_p = 10 \text{ А}$ , емкость  $Q = 60 \text{ А} \cdot \text{ч}$ .

III. Электрическую схему.

IV. Расчет схемы и выбор аппаратуры.

V. Теоретические выкладки, расчетные формулы, замечания, вопросы, возникшие в процессе работы.

VI. Наблюдения и подсчеты, сведенные в таблицы.

VII. Кривые и графики, выполненные от руки.

При выполнении работы необходимо следить за соблюдением правил техники безопасности.

Категорически воспрещается касаться руками незащищенных проводов и зажимов, когда цепь находится под напряжением.

По каждой выполненной работе составляется отчет.

Отчеты выполняются на листах бумаги в клетку ( $33 \times 21 \text{ см}$ ), с левой стороны листа оставляется поля шириной 3 см. Отчет выполняется чернилами с применением чертежных инструментов; выполнение должно быть аккуратным.

Отчет должен содержать:

1. Наименование работы и ее номер.

2. Фамилию и инициалы учащегося, номер группы и дату выполнения.

3. Перечень аппаратуры.

4. Краткое описание работы,

5. Схему соединения,

6. Наблюдения и расчеты, записанные в таблицу.

7. Кривые и графики, размеры которых не должны быть меньше  $8 \times 8$  см:

Графики должны быть построены на миллиметровой бумаге или бумаге с нанесенной на ней масштабной сеткой. При выборе масштаба число единиц в 1 см (или отрезке длины, принятом за единицу, например в стороне одной клетки клетчатой бумаги) должно выражаться числами:  $1 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$  или  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  — целое число.

8. Заключение по работе.

Отчет сдается при следующем посещении лаборатории.

## Б. ДОПУСТИМЫЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Каждая электрическая цепь состоит из ряда элементов: 1) источника электрической энергии; 2) приемников электрической энергии; 3) регулирующих приборов или аппаратов (реостаты, реактивные катушки); 4) измерительных приборов; 5) коммутационных приборов и аппаратов (рубильники, переключатели); 6) соединительных проводов.

Источниками электрической энергии являются генераторы, аккумуляторы или гальванические элементы.

Генератор характеризуется: а) номинальным напряжением  $U_H$ , током  $I_H$  и мощностью  $P_H$ ; б) номинальной скоростью вращения  $n_H$ ; в) родом тока, а генераторы переменного тока, кроме того, — номинальной частотой  $f_H$ .

Аккумуляторы и гальванические элементы характеризуются: а) номинальным э. д. с.  $E_H$  и разрядным номинальным током  $I_H$ ; б) емкостью, т. е. количеством электричества, которое можно получить от аккумулятора или элемента.

Приемниками электрической энергии являются двигатели, нагревательные приборы, лампы накаливания, резисторы и т. п.

Нагревательные приборы, лампы накаливания и другие приемники энергии характеризуются номинальным напряжением, током или мощностью, а некоторые из них — родом тока и частотой.

Резисторы и реостаты характеризуются значением сопротивления и номинальным током.

Коммутационные приборы также характеризуются номинальными значениями тока и напряжения.

Номинальным значением (тока, напряжения, мощности) называется значение, указанное заводом на щитке соответствующей машины или аппарата.

Номинальное значение представляет собой наибольшее значение параметра, на которое рассчитана и изготовлена машина или аппарат, исходя из условий допустимой электрической и механической прочности и допустимого нагревания при длительной работе. Таким образом, машину или аппарат нельзя нагружать выше номинальных значений во избежание перегрузки или недопустимого нагрева.

Наиболее часто применяемыми измерительными приборами являются амперметр, вольтметр, ваттметр. Они характеризуются системой, определяющей свойства прибора, классом точности и номинальными значениями тока, напряжения, мощности, под которыми понимают верхний предел измерения прибора или наибольшее зна-

чение, допустимое в последовательной или параллельной цепях прибора.

Соединительные провода можно нагружать током исходя из условий допустимого нагревания их током (допустимые токи для сечения проводников: 1 мм<sup>2</sup> — 17 А; 1,5 мм<sup>2</sup> — 23 А; 2,5 мм<sup>2</sup> — 30 А; 4 мм<sup>2</sup> — 41 А; 6 мм<sup>2</sup> — 50 А; 10 мм<sup>2</sup> — 80 А) или из условий допустимого падения напряжения в них.

Перед монтажом каждой электрической цепи необходимо проверить возможность применения каждого прибора или аппарата в данной цепи, т. е. проверить, соответствуют ли номинальные значения величин отдельных машин, приборов и аппаратов друг другу, так как в противном случае отдельные элементы схемы могут оказаться в ненормальных условиях (одни могут быть перегружены, другие, наоборот, могут оказаться в условиях значительной недогрузки и не будут выполнять своего назначения).

Например, в цепи, данной на рис. 14-1, при наличии аккумулятора с э. д. с.  $E = 6$  В и разрядным током  $I_p = 5$  А, реостата с сопротивлением  $r_p = 0,6$  Ом и номинальным током  $I_{p.н} = 3$  А, амперметра с номинальным током  $I_{п.а} = 5$  А и вольтметра с номинальным напряжением  $U_H = 65$  В при замыкании рубильника будет проходить ток

$$I = E/r_p = 6/0,6 = 10 \text{ А.}$$

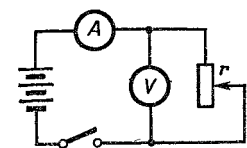


Рис. 14-1. Схема для измерения сопротивления амперметром и вольтметром.

Такой ток недопустим для аккумулятора, реостата и амперметра, так как номинальные токи их меньше указанного тока. Вольтметр не измерит напряжения на зажимах цепи, так как измеряемое напряжение значительно (в 11 раз) меньше номинального напряжения вольтметра, между тем как рабочая часть шкалы вольтметра (амперметра) обычно начинается с 20%-ного номинального напряжения (тока).

По указанным соображениям в заданиях к лабораторным работам требуется: 1) ознакомиться с приборами для производства работы и записать номинальные значения величин; 2) проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме. Рассмотрим на нескольких примерах, как производится эта проверка.

**Пример 14-1.** Проверить возможность применения следующей аппаратуры в работе с зеркальным гальванометром (§ 14-3, рис. 14-5):

1. Сухой элемент с э. д. с.  $E = 1,5$  В, с разрядным током  $I_p = 0,1$  А.
2. Реостат с сопротивлением  $r_1 = 100$  Ом, с номинальным током  $I_{н1} = 0,6$  А.
3. Реостат с сопротивлением  $r_2 = 400$  Ом, с номинальным током  $I_{н2} = 0,5$  А.
4. Миллиамперметр магнитоэлектрической системы класса точности 0,5 с номинальным током  $I_H = 5$  мА.
5. Магазин резисторов  $r_3$  на номинальный ток  $I_H = 0,1$  А с катушками сопротивлений 100, 200, 300 и 400 Ом.
6. Образцовый резистор с номинальным сопротивлением  $r_0 = 0,1$  Ом.

7. Магазин резисторов  $r_d$  с сопротивлениями 100, 200, 300, 400, 1000, 2000, 3000 и 4000 Ом.

8. Зеркальный гальванометр типа М17/5 с постоянной по току  $C_I = 12 \cdot 10^{-10}$  А/мм, сопротивлением обмотки  $r_r = 100$  Ом, с внешним критическим сопротивлением  $r_{кр. вн} = 1600$  Ом.

Проверка.

Так как разрядный ток элемента  $I_p = 0,1$  А, то сопротивление  $r_1 + r_2$  должно быть не меньше

$$E/I_p = 1,5 \text{ В}/0,1 \text{ А} = 15 \text{ Ом.}$$

Имееющееся сопротивление  $r_1 + r_2$  равно  $100 + 400 = 500$  Ом, что, очевидно, является приемлемым.

Ток в цепи миллиамперметра должен быть не больше его номинального тока, т. е. не больше 5 мА.

Для получения такого тока при напряжении  $U = E = 1,5$  В сопротивление цепи миллиамперметра должно быть не меньше

$$r = r_3 + r_0 + r_{мА} = 1,5/0,005 = 500 \text{ Ом,}$$

так что сопротивление магазина  $r_3 = 100 \div 1000$  Ом допустимо.

При отклонении светового зайчика на всю шкалу (200 мм) ток гальванометра

$$I_{г. н} = C_I \cdot 200 = 12 \cdot 10^{-10} \cdot 200 = 24 \cdot 10^{-8} \text{ А.}$$

При этом токе ( $I_{г. н}$ ) и внешнем критическом сопротивлении  $r_d = r_{кр. вн} = 1600$  Ом напряжение на образцовой катушке

$$U_0 = I_{г. н} (r_{кр. вн} + r_r) = 24 \cdot 10^{-8} (1600 + 100) \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

При сопротивлении образцового резистора  $r_0 = 0,1$  Ом и токе в его цепи, примерно равном току миллиамперметра, получим:

$$I = U_0/r_0 = 4 \cdot 10^{-4}/0,1 = 4 \cdot 10^{-3} = 4 \text{ мА.}$$

Очевидно, сопротивление образцового резистора  $r_0 = 0,1$  Ом приемлемо.

Для выяснения влияния сопротивления контура гальванометра на характер движения рамки гальванометра достаточно изменить сопротивление  $r_d$  в границах от  $r_{кр. вн}/5$  до  $5 r_{кр. вн}$ , т. е. от  $1600 : 5 = 320$  Ом до  $1600 \cdot 5 = 8000$  Ом, что можно получить при имеющемся магазине резисторов.

Таким образом, имеющаяся аппаратура пригодна для выполнения работы.

**Пример 14-2.** Проверить, возможно ли при проверке ваттметра по схеме, данной в § 14-12 на рис. 14-10, а, применение следующей аппаратуры:

1) ваттметра (поверяемого) ферродинамической системы класса точности 1,5,  $I_H = 5$  А,  $U_H = 120$  В,  $P_H = 600$  Вт;

2) ваттметра (образцового) электродинамической системы класса точности 0,5,  $I_H = 5$  А,  $U_H = 150$  В,  $P_H = 750$  Вт;

3) амперметра электромагнитной системы класса точности 1,5,  $I_H = 5$  А;

4) вольтметра электромагнитной системы класса точности 1,5,  $U_H = 140$  В;

5) реостата с сопротивлением  $r_2' = 3,5$  Ом,  $I_H' = 5$  А;

6) реостата с сопротивлением  $r_2'' = 0,5$  Ом,  $I_H'' = 10$  А;

7) понижающего силового трансформатора с номинальным коэффициентом трансформации  $k_H = 120 \text{ В}/4 \text{ В}$ , номинальной мощностью  $S_H = 20 \text{ В} \cdot \text{А}$  и номинальной частотой  $f_H = 50 \text{ Гц}$ ;

8) реостата с сопротивлением  $r_1 = 400 \text{ Ом}$  и  $I_H = 0,5 \text{ А}$ .

Проверка.

1. Образцовый ваттметр удовлетворяет требованиям гл. 14, В. Так как показания амперметра и вольтметра не используются при определении погрешностей, а служат только для контроля режима работы цепи, то точность их является достаточной.

2. Проверка возможности применения аппаратуры для последовательной цепи.

Пользуясь табл. 1-6, находим сопротивления последовательных обмоток ваттметра  $r_{WI} = 0,24 \text{ Ом}$  и сопротивление амперметра  $r_A = 0,1 \text{ Ом}$ .

Приняв сопротивления соединительных проводов и сопротивление контактов для каждого прибора равным  $0,1 \text{ Ом}$ , получим сопротивление цепи  $r_{п.ц}$ , подключенной ко вторичной обмотке трансформатора, при выведенных сопротивлениях реостатов:

$$r_{п.ц} = 0,24 \cdot 2 + 0,1 + 0,1 \cdot 3 \approx 0,9 \text{ Ом}.$$

Так как номинальный ток ваттметра  $I_H \approx 5 \text{ А}$ , то необходимое напряжение на вторичной обмотке трансформатора должно быть не меньше

$$U_{H2} = r_{п.ц} I_H = 0,9 \cdot 5 \approx 5 \text{ В}.$$

Номинальная мощность трансформатора

$$S_H = U_{H2} I_H = 5 \cdot 5 = 25 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Очевидно, имеющийся трансформатор не подходит для нашей работы и должен быть заменен другим с номинальной мощностью

$$S'_H \geq 25 \text{ В} \cdot \text{А}$$

и номинальным коэффициентом трансформации

$$k'_H = 120 \text{ В}/5 \text{ В}.$$

Так как первая точка шкалы поверяемого ваттметра соответствует примерно 10% номинальной мощности ваттметра (50 Вт), что соответствует току в последовательной цепи  $50 : 120 \approx 0,4 \text{ А}$ , то сопротивление реостата должно быть не меньше

$$r = 5/0,4 = 12 \text{ Ом}.$$

Таким образом, имеющиеся реостаты с сопротивлениями  $r'_2 + r''_2 = 4 \text{ Ом}$  также не подходят для работы и должны быть заменены реостатами с сопротивлениями

$$r'_2 = 10 \text{ Ом} \text{ и } r''_2 = 2 \text{ Ом}.$$

3. Проверка возможности применения аппаратуры для параллельной цепи.

По табл. 1-6 находим мощность вольтметра и параллельных цепей ваттметров:

$$P_{пар.ц} = 6 + 5 + 10 \approx 20 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Ток, потребляемый параллельными цепями,

$$I_{пар.ц} = 20/110 = 0,2 \text{ А}.$$

Сопротивление параллельных цепей

$$r_{\text{пар. ц}} = 120/0,2 = 600 \text{ Ом.}$$

Реостат для регулирования напряжения на параллельных цепях приборов следует брать с сопротивлением того же порядка, что и сопротивление цепей, так как в реостате со значительно меньшим сопротивлением будет развиваться большая мощность, а реостат с сопротивлением, значительно большим, не обеспечит плавной регулировки напряжения. Имеющийся в нашем распоряжении реостат с сопротивлением  $r_1 = 400 \text{ Ом}$  вполне пригоден для нашего случая.

Так как по цепи реостата проходит ток, равный сумме тока, обусловленного сопротивлением реостата, и тока параллельных цепей измерительных приборов, то реостат должен быть рассчитан на ток

$$I_p = U/r_1 + I_{\text{пар. ц}} = 120/400 + 0,2 = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ А.}$$

По току имеющийся реостат  $r_1$  также является приемлемым.

### **В. УКАЗАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ПОВЕРКЕ АМПЕРМЕТРОВ, ВОЛЬТМЕТРОВ, ВАТТМЕТРОВ**

При эксплуатации приборов могут иметь место повреждения, изменения и износ отдельных частей прибора, что приводит к нарушению нормальной работы прибора и появлению недопустимых погрешностей. Это делает необходимым производить поверку приборов не только при выпуске их с завода (первичная поверка), но и периодически во время эксплуатации их.

Периодические поверки приборов производятся: 1) органами Государственной метрологической службы (Госнадзором); 2) органами ведомственной метрологической службы.

Поверкой прибора (средства измерения) называется определение погрешностей прибора и установление его пригодности к применению или определение, находятся ли погрешности в допустимых границах.

Поверка прибора состоит из четырех частей: 1) внешнего осмотра прибора; 2) выбора образцового прибора и подготовки к поверке; 3) поверки показаний прибора; 4) документального оформления поверки.

1. Внешний осмотр прибора имеет целью выявить дефекты, могущие препятствовать дальнейшему применению прибора, например: повреждение стекла, корректора, стрелки или наличие отсоединившихся деталей и т. п.

2. Выбор образцового прибора производится: а) по роду тока; б) по номинальным значениям величин; в) по классу точности.

Род тока, на котором производится поверка, определяется системой поверяемого прибора, его конструкцией, свойствами и назначением. Например: приборы магнитоэлектрической системы поверяются только на постоянном токе; приборы индукционной системы — только на переменном токе; приборы термоэлектрической и электромагнитной систем — или на постоянном, или на переменном.

При выборе рода тока следует учитывать имеющийся на шкале поверяемого прибора знак рода тока.

При выборе образцового прибора по номинальным значениям его параметра необходимо, чтобы его верхний предел измерения был равен или близок к верхнему пределу измерения поверяемого прибора; в противном случае относительные (но не приведенные) погрешности образцового прибора могут быть недопустимо велики.

При выборе образцового прибора по классу точности необходимо, чтобы допустимая (приведенная) погрешность его была по крайней мере в 3 раза меньше допустимой (приведенной) погрешности поверяемого прибора.

Таким образом, поверка приборов классов точности 1,5 и 2,5 производится по приборам класса точности 0,5; поверка приборов класса точности 1 — по приборам класса 0,2; поверка приборов класса точности 0,5 — по приборам класса 0,1, а приборов классов 0,1 и 0,2 может производиться только на компенсаторах, которые обеспечивают погрешность 0,02—0,03%.

При применении компенсаторов для проверки приборов необходимо пользоваться нормальными элементами класса точности 0,005 или 0,02.

Поверка технических приборов производится путем сравнения показаний их с показаниями образцовых приборов.

Схема соединения для поверки технических приборов должна быть такой, чтобы при поверке амперметра ток поверяемого амперметра был в точности равен току образцового амперметра, при поверке вольтметра напряжение на поверяемом вольтметре в точности равно напряжению на образцовом вольтметре, а при поверке ваттметра (счетчика фазометра) ток последовательной обмотки поверяемого ваттметра был равен току соответствующей обмотки образцового ваттметра и напряжение на параллельной цепи поверяемого ваттметра было равно напряжению на соответствующей цепи образцового ваттметра.

Кроме того, схема поверки и применяемая аппаратура должны обеспечить: 1) возможность плавной регулировки показаний приборов на протяжении всей рабочей части шкалы; 2) наименьший расход энергии при поверке; 3) удобство работы.

После сборки схемы рукоятки регулирующих устройств устанавливаются в положения, соответствующие наименьшим показаниям приборов (наименьшим значениям токов и напряжений).

3. Поверке подлежат все основные (оцифрованные) деления шкалы. Поэтому перед замыканием рубильника стрелки приборов устанавливаются на нулевые деления шкал, что и отмечается в протоколе поверки как первое наблюдение. После этого схему включают под напряжение и при помощи регулирующих устройств изменяют ток или напряжение так, чтобы стрелка поверяемого прибора последовательно устанавливалась над каждым основным делением шкалы, при этом производят запись показаний обоих приборов. Регулировку следует вести так, чтобы показания поверяемого прибора сначала от нуля постепенно увеличивались до номинального значения, а затем плавно уменьшались до нуля. После замыкания рубильника производится определение положения стрелок приборов и производится запись последнего наблюдения. Если после размыкания рубильника стрелка поверяемого прибора не дойдет до нуля, то это укажет на наличие заметной погрешности от трения.

Определение погрешностей и поправок производится по формулам, приведенным ниже.



Проверка приборов (лабораторных) сопровождается оформлением ее протоколом проверки, в котором должны быть даны таблицы и кривая поправок.

## Г. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### 14-1. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА (РАБОТА 1)

Для проверки амперметров можно применять различные схемы (рис. 14-2, а—д). Применение двух реостатов — одного как делителя напряжения, а второго как регулятора тока — или применение двух последовательно соединенных реостатов, отношение сопротивлений

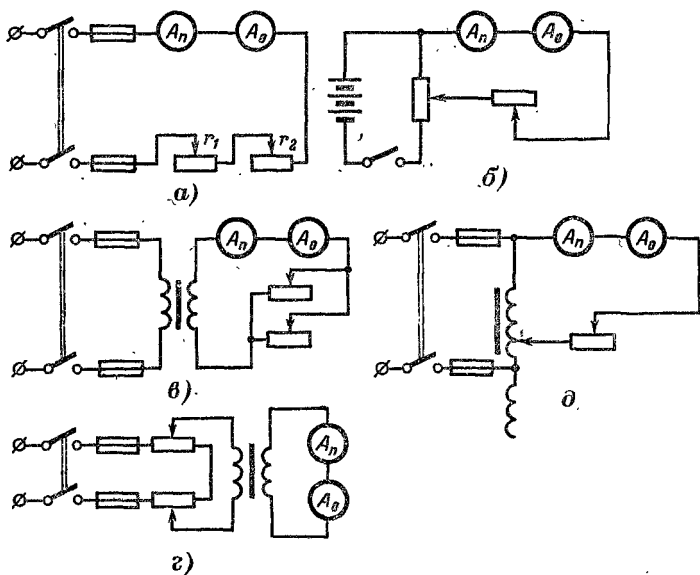


Рис. 14-2. Схемы соединения для проверки технического амперметра.

а и б — с применением двух реостатов; в — с применением трансформатора и двух реостатов во вторичной цепи; г — с применением трансформатора и двух реостатов в первичной цепи; д — с применением автотрансформатора и реостата.

которых  $r_1/r_2 \approx 4 \div 8$ , обеспечивает возможность грубой и тонкой регулировки тока цепи. Применение при переменном токе понижающего нагрузочного трансформатора уменьшает затраты энергии при проверке и дает возможность применять менее громоздкие, а следовательно, более дешевые и удобные для работы реостаты. Схема, данная на рис. 14-2, г, особенно удобна при проверке амперметров на большие токи, так как позволяет применять реостаты на токи значительно меньше номинального тока проверяемого прибора,

## З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, и записать систему приборов, номинальные значения ве-

Таблица 14-1

№ наблюдений	Показания приборов						Погрешности		Поправки $\delta_I$	Примечание
	поверяемого	образцового					абсолютные $\Delta I$	приведенные $\gamma_I$		
		ход вверх		ход вниз		среднее				
	А	дел.	А	дел.	А		А	А	%	

личин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. После замыкания рубильника при различных токах произвести запись показаний амперметров и определить для данного поверяемого амперметра абсолютные и приведенные погрешности и абсолютные поправки по формулам:

$$\Delta I = I_{\text{п}} - I_{\text{о}}; \quad \gamma_I = (\Delta I / I_{\text{п.н}}) \cdot 100\%; \quad \delta_I = I_{\text{о}} - I_{\text{п.}}$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-1.

5. По данным опыта и подсчета построить кривую поправок в зависимости от показаний поверяемого прибора (рис. 14-3),

6. Дать заключение о поверяемом приборе (гл. 14, В).

### 14-2. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА (РАБОТА 2)

Для поверки вольтметра можно применять схему соединения, данную на рис. 14-4, а, в которой регулировка напряжения производится при помощи реостатов, или на рис. 14-4, б — при помощи лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР.

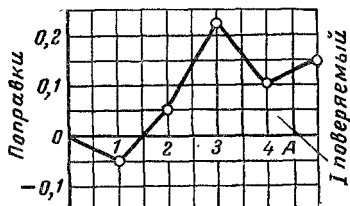


Рис. 14-3. Кривая поправок к амперметру.

## З а д а н и е

1. Ознакомьтесь с приборами, необходимыми для производства работы, записать их систему, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. После замыкания рубильника при различных напряжениях произвести запись показаний вольтметров и определить абсолютные и приведенные погрешности и поправки для поверяемого вольтметра по формулам:

$$\Delta U = U_{\text{п}} - U_0;$$

$$\gamma_U = (\Delta U / U_{\text{п.н}}) \cdot 100\%;$$

$$\delta_U = U_0 - U_{\text{п}}.$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-2.

5. По данным опыта и подсчета построить кривую поправок в зависимости от показаний поверяемого вольтметра.

6. Дать заключение о поверяемом приборе (гл. 14, В).

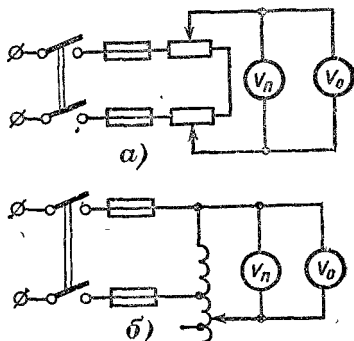


Рис. 14-4. Схема соединения для проверки технического вольтметра.

а — с применением двух реостатов;  
б — с применением автотрансформатора.

Т а б л и ц а 14-2

№ наблюдений	Показания приборов					Погрешности		Поправки $\delta U$	Примечание
	поверяемого	образцового					абсолютные $\Delta U$		
		ход вверх		ход вниз		среднее			
		В	дел.	В	дел.			В	

### 14-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА (РАБОТА 3)

а) *Определение критического и внутреннего сопротивлений гальванометра*

Для определения критического сопротивления гальванометра пользуются схемой, данной на рис. 14-5.

Отрегулировав оптическое приспособление для производства зеркального отсчета, устанавливают световой зайчик на нулевое

деление шкалы. При сопротивлении добавочного резистора  $r_d$ , в 5 раз большем критического сопротивления гальванометра (указанного в его паспорте), и положении движков реостатов  $r_1$  и  $r_2$  у зажимов  $a_1, a_2$  замыкают переключатель  $\Pi$  и рубильники  $P$  и  $P_1$ . Реостатами  $r_1$  и  $r_2$  устанавливают такой ток в цепи гальванометра, при котором световой зайчик отклонится на 150 мм шкалы.

Размыкая рубильник  $P$ , замечают характер движения подвижной части гальванометра и определяют по секундомеру время успокоения. Затем такие же наблюдения повторяют, уменьшая сопротивление резистора  $r_d$ .

При некотором сопротивлении резистора  $r'_d$  при размыкании рубильника  $P$  подвижная часть будет приходить в нулевое положение без колебаний за кратчайший промежуток времени.

Гальванометр, работающий в таком «пограничном» режиме, называется критически успокоенным, а сопротивление цепи гальванометра  $r_{г.п} + r'_d + r_o = r_{к.п}$  — полным критическим сопротивле-

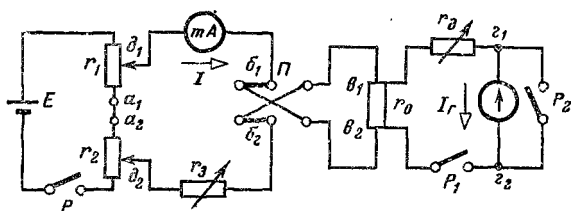


Рис. 14-5. Схема для градуировки зеркального гальванометра.

нием гальванометра. Сопротивление  $r_{к.п} - r_{г.п} = r'_d + r_o = r_{к.в}$  называется внешним критическим сопротивлением.

Для проверки критического сопротивления рекомендуется найденное значение  $r'_d$  увеличить на 5%, и если в этом случае движение подвижной части будет колебательным, то критическое сопротивление определено правильно.

Для определения внутреннего сопротивления гальванометра  $r_{г}$  пользуются той же схемой (рис. 14-5).

Допустим, что при некотором определенном значении сопротивления  $r_{д1}$  и токе миллиамперметра  $I_1$  в гальванометре проходит ток  $I_{г1} = C_{г} n_1$ .

Поддерживая ток в миллиамперметре  $I_1$  неизменным, изменяют сопротивление  $r_d$  до значения  $r_{д2}$ , при котором ток в гальванометре увеличится вдвое, т. е.  $I_{г2} = 2I_{г1}$ . Допуская, что ток в образцовой катушке  $r_o$  практически равен току миллиамперметра  $I_1$ , можно написать:

$$I_1 r_o = I_{г1} (r_{д1} + r_{г}) = 2I_{г1} (r_{д2} + r_{г}),$$

откуда сопротивление гальванометра

$$r_{г} = r_{д1} - 2r_{д2}.$$

## З а д а н и е 1

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 14-5) и показать ее для проверки руководителю.

4. Установить и отрегулировать приспособление для зеркального отсчета так, чтобы световой зайчик был резко виден на нулевом делении шкалы.

5. Определить критическое сопротивление гальванометра. Для этого, изменяя сопротивление добавочного резистора от  $r_d = 5 r_{кр}$  до  $r_d = 0,5 r_{кр}$ , для каждого из значений  $r_d$  определить характер движения и время успокоения подвижной части гальванометра  $t_y$ , т. е. время с момента выключения рубильника  $P$  до момента возвращения светового зайчика на нуль шкалы.

6. Наблюдения записать в табл. 14-3.

Т а б л и ц а 14-3

№ наблюдений	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r_d$ , Ом										
$t_y$ , с										
Характер движения										

7. Определить внутреннее сопротивление гальванометра  $r_g$ . Для этого при сопротивлении  $r_d = r_{кр}$  реостатами  $r_1$  и  $r_2$  получить отклонение светового зайчика гальванометра на 50 мм шкалы и записать значения  $I_1$ ,  $r_{д1}$  и  $n_1$ . При том же токе в миллиамперметре, изменяя сопротивление резистора  $r_d$ , получить отклонение светового зайчика на 100 мм шкалы и записать величины  $I$ ,  $r_{д2}$  и  $n_2$ . Вычислить сопротивление гальванометра.

### б) Определение постоянной гальванометра по току

Для определения постоянной гальванометра по току пользуются схемой, данной на рис. 14-5.

При критически успокоенном гальванометре, перемещая движки  $\delta_1$  и  $\delta_2$  реостатов  $r_1$  и  $r_2$ , получают различные отклонения подвижной части гальванометра (отклонение светового зайчика на шкале  $n$  равно 10, 30, 50, 90, 110, 130, 150, 200 мм), замечая при этом показания миллиамперметра  $I$ . Для каждого значения тока  $I$  необходимо получить два отклонения светового зайчика  $n'$  и  $n''$ , соответствующие двум направлениям тока. Для определения постоянной гальванометра по току находят среднее арифметическое  $n = (n' + n'')/2$ .

Принимая ток в образцовой катушке практически равным току миллиамперметра, т. е.  $I - I_{\Gamma} \approx I$ , постоянную по току (А/мм) можно определить по формуле

$$C_I = I_{\Gamma} / n = I r_0 / [(r_{\Gamma} + r_{\text{д}}) n].$$

Величина, обратная постоянной гальванометра по току, т. е. чувствительность гальванометра к току (мм/А),

$$S_I = 1 / C_I = n / I_{\Gamma}.$$

в) *Определение периода собственных колебаний*

Для определения периода собственных колебаний при замкнутых рубильниках  $P$  и  $P_1$  и переключателе  $\Pi$  получают отклонение светового зайчика почти на всю шкалу. Разомкнув рубильник  $P_1$ , отсчитывают продолжительность нескольких периодов колебаний подвижной части, включая и выключая секундомер при прохождении светового зайчика через нулевую отметку шкалы. Опыт повторяют несколько раз (2—3 раза). Период колебаний  $T_0$  определяют как среднее арифметическое из найденных значений.

**З а д а н и е 2**

1. Определить постоянную гальванометра по току при различных токах (при различных  $n$ ).
  2. Построить градуировочную кривую  $I_{\Gamma} = f(n)$ .
  3. Определить период собственных колебаний  $T_0$ .
- Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-4.

Т а б л и ц а 14-4

№ наблюдений	$I$	$n_1$	$n_2$	$n = \frac{n_1 + n_2}{2}$	$I_{\Gamma}$	$C_I$	$S_I$	$r_{\Gamma}$	$r_{\text{д}}$	$r_{\text{кр. в}}$	$r_{\text{кр. п}}$	$T_0$
	А	мм	мм	мм	А	$\frac{\text{А}}{\text{мм}}$	$\frac{\text{мм}}{\text{А}}$	Ом	Ом	Ом	Ом	с

**14-4. ПОВЕРКА ОБРАЗЦОВЫХ ПРИБОРОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОТЕНЦИОМЕТРА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА (РАБОТА 4)**

а) *Проверка образцового вольтметра*

Проверка вольтметра заключается в сравнении показаний поверяемого вольтметра с напряжением, измеренным при помощи потенциометра, которое принимается за действительное значение напряжения.

### З а д а н и е 1

1. Ознакомьтесь с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме, определить зажимы делителя напряжения, которыми он будет присоединен к потенциометру, и определить коэффициент делителя напряжения  $k = r_d/r$  (§ 5-3).

3. Подсчитать напряжения на зажимах потенциометра  $U_{\text{пот}}$ , соответствующие оцифрованным делениям шкалы поверяемого вольтметра  $U_{\text{п}}$ .

4. Собрать схему (рис. 5-5) и показать ее для проверки руководителю.

5. Произвести поверку всех оцифрованных делений шкалы вольтметра.

6. Определить абсолютные и приведенные погрешности и поправки для поверяемого вольтметра по формулам:

$$\Delta U = U_{\text{п}} - U; \quad \gamma_U = (\Delta U / U_{\text{п.н}}) \cdot 100\%; \quad \delta_U = U - U_{\text{п}}$$

7. Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-5.

Т а б л и ц а 14-5

№ наблюдений	Показания поверяемого вольтметра $U_{\text{п}}$	Напряжение на потенциометре $U_{\text{пот}}$	Действительное значение напряжения $U$	Погрешности		Поправка $\delta_U$	Примечание
				абсолютная $\Delta U$	приведенная $\gamma_U$		
	В	В	В	В	%	В	

8. Построить кривую поправок.

9. Дать заключение о поверяемом вольтметре.

#### б) Поверка образцового амперметра

Поверка амперметра заключается в сравнении показаний амперметра с током, идущим по образцовому резистору, соединенному последовательно с амперметром (рис. 5-6).

Действительный ток  $I$  в образцовом резисторе находят, деля измеренное потенциометром падение напряжения на этом резисторе  $U_0$  на его сопротивление  $r_0$ .

### З а д а н и е 2

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, и записать: номинальные значения величин, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители,

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.
3. Подсчитать падение напряжения на образцовом резисторе при токах, соответствующих оцифрованным делениям шкалы поверяемого амперметра.
4. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 5-6, и показать ее для проверки руководителю.
5. Произвести поверку всех оцифрованных делений шкалы поверяемого амперметра.

Таблица 14-6

№ наблюдений	Показания поверяемого амперметра $I_{п}$	Измеренное падение напряжения $U_0$	Сопротивление образцового резистора $r_0$	Действительное значение тока $I$	Погрешности		Поправки $\delta_I$	Примечание
					абсолютные $\Delta I$	приведенные $\gamma_I$		
А	В	Ом	А	А	%	А		

6. Определить абсолютные погрешности, поправки и приведенные погрешности для поверяемого амперметра по формулам:

$$\Delta I = I_{п} - I; \quad \gamma_I = (\Delta I / I_{п.н}) \cdot 100\%; \quad \delta_I = I - I_{п.н}$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-6.

7. Построить кривую поправок.
8. Дать заключение о поверяемом амперметре (гл. 14, В).

#### 14-5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА (РАБОТА 5)

##### а) Метод непосредственного измерения токов

Этот метод наиболее прост, но обладает небольшой точностью. Он применяется для проверки трансформаторов тока классов точности 3 и 10, для которых нормируется только токовая погрешность.

На рис. 14-6 дана одна из возможных схем для определения погрешности коэффициента трансформации трансформатора тока.

Ток в первичной обмотке трансформатора тока регулируется реостатами, к движкам которых присоединена первичная цепь силового понижающего трансформатора  $Tr$ . Градуированный реостат  $r_a$  позволяет изменять сопротивление вторичной цепи трансформатора тока.



Измерив токи  $I_1$  и  $I_2$ , можно определить действительный коэффициент трансформации  $k = I_1/I_2$ .

Погрешность в коэффициенте трансформации

$$\gamma_k = [(k_H - k)/k] \cdot 100\%$$

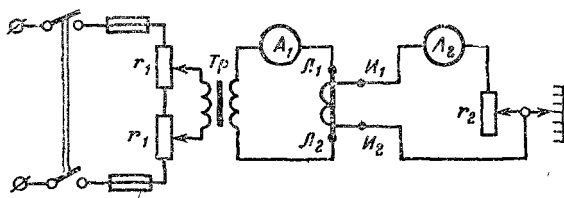


Рис. 14-6. Схема для проверки трансформатора тока.

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы. Записать номинальные значения величин, системы, классы точности, заводские номера и другие технические данные, а также заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. При различных значениях первичного тока в пределах 20—100% номинального при номинальном сопротивлении вторичной цепи трансформатора определить коэффициент трансформации и его погрешность.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-7.

Т а б л и ц а 14-7

№ наблюдений	$I_1$	$I_2$	$k = I_1/I_2$	$k_H$	Погрешности $\gamma_k$	Сопротивление вторичной цепи $z_2$	Примечание
	А	А	—	—			

5. При первичном токе, равном 50% номинального, и сопротивлении вторичной цепи трансформатора тока, составляющем 20, 50, 100, 150 и 200% номинального, определить коэффициенты трансформации и его погрешности.

6. По полученным данным построить кривые погрешности трансформатора: а) в зависимости от  $\gamma_k = f(I_1)$  при  $z_2 = \text{const}$ ; б) в зависимости от сопротивления вторичной цепи  $\gamma_k = f(z_2)$  при  $I_1 = \text{const}$ .

7. Дать заключение о проверяемом трансформаторе.

## б) Дифференциально-нулевой метод

Более точные определения погрешности в коэффициенте трансформации и угловой погрешности трансформатора тока можно произвести при помощи дифференциального прибора, например типа АТТ, схема которого дана на рис. 14-7, а.

Первичные обмотки поверяемого  $Tr_x$  и образцового  $Tr_0$  трансформаторов соединены последовательно, и по ним проходит ток  $I_1$ .

Последовательно со вторичной обмоткой образцового трансформатора соединена первичная обмотка образцовой катушки  $M$  взаимной индуктивности, вторичная обмотка которой замкнута на реохорд  $аб$ .

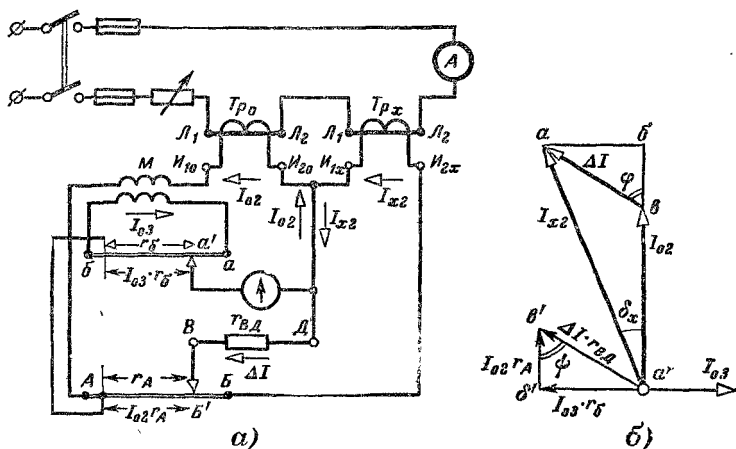


Рис. 14-7. Принципиальная схема (а) проверки трансформатора тока при помощи дифференциального прибора и векторная диаграмма (б).

Вторичный ток  $I_{02}$  образцового трансформатора проходит по контуру  $И_{10}AB'ВДИ_{20}$ .

Вторичный ток  $I_{x2}$  поверяемого трансформатора проходит по контуру  $И_{1x}ДВБ'БИ_{2x}$ .

Таким образом, в резисторе  $r_{ВД}$  идет ток  $\Delta I$ , равный разности токов  $I_{x2}$  и  $I_{02}$ .

На векторной диаграмме (рис. 14-7, б) даны векторы этих трех токов. На той же диаграмме дан вектор тока  $I_{03}$  вторичной обмотки катушки взаимной индуктивности. Так как э. д. с., наведенная во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, отстает по фазе от тока  $I_{02}$  на угол, равный  $\pi/2$ , а сопротивление этой цепи активное, то ток  $I_{03}$  также отстает по фазе от тока  $I_{02}$  на  $\pi/2$ .

Считая погрешности образцового трансформатора тока равными нулю, угол  $\delta_x$ , образованный векторами токов  $I_{x2}$  и  $I_{02}$ , можно рассматривать как угловую погрешность поверяемого трансформатора тока. Так как угловая погрешность трансформатора тока

мала (порядка  $1^\circ$ ), то ток  $I_{x2}$  (рис. 14-7, б) можно считать равным проекции его вектора на направление вектора тока  $I_{O2}$ , т. е.

$$I_{x2} \cos \delta'_x = I_{x2} = I_{O2} + \Delta I \cos \psi,$$

откуда погрешность трансформатора по току

$$\gamma_x = \frac{I_{x2} - I_{O2}}{I_{O2}} \cdot 100\% = \frac{\Delta I \cos \psi}{I_{O2}} \cdot 100\%. \quad (14-1)$$

Из той же векторной диаграммы с достаточной точностью получим:

$$\operatorname{tg} \delta'_x = (\Delta I \sin \psi) / I_{O2}.$$

Но так как  $\delta'_x$  мал, то  $\delta'_x = \operatorname{tg} \delta'_x$  и, следовательно,

$$\delta'_x = (\Delta I \sin \psi) / I_{O2}.$$

Выражая  $\delta'_x$  не в радианах, а в минутах, получаем:

$$\delta'_x = 3438 \frac{\Delta I \sin \psi}{I_{O2}} = \frac{\Delta I \sin \psi}{0,000291 I_{O2}}. \quad (14-2)$$

Для определения погрешностей трансформатора движки прибора  $a'$  и  $B'$  перемещают так, чтобы получить нулевое значение тока в вибрационном гальванометре ( $\alpha_r = 0$ ). В этом случае вектор падения напряжения на резисторе  $r_{ВД}$  будет равен сумме векторов падений напряжений на сопротивлениях  $r_A$  и  $r_B$  (рис. 14-7).

Падение напряжения на сопротивлении  $r_A$  совпадает по фазе с током  $I_{O2}$ , а падение напряжения на сопротивлении  $r_B$  сдвинуто по фазе относительно тока  $I_{O2}$  на угол, равный  $\pi/2$ . Таким образом, треугольники  $abc$  и  $a'b'e'$  (рис. 14-7, б) будут подобны, откуда

$$\cos \psi = I_{O2} r_A / (\Delta I r_{ВД}),$$

а

$$\sin \psi = I_{O2} r_B / (\Delta I r_{ВД}).$$

Подставляя полученные значения в (14-1) и (14-2), получаем:

$$\gamma'_x = \frac{\Delta I I_{O2} r_A}{I_{O2} \Delta I r_{ВД}} \cdot 100\% = \frac{r_A}{r_{ВД}} \cdot 100\% \quad (14-3)$$

и

$$\delta'_x = \frac{\Delta I I_{O2} r_B}{0,000291 I_{O2} \Delta I r_{ВД}} = k \frac{r_B}{r_{ВД}}, \quad (14-4)$$

где  $k = \frac{1}{0,000291} \frac{I_{O2}}{I_{O2}}$  — постоянный коэффициент.

Полученные выражения показывают, что погрешности поверяемого трансформатора определяются отношением сопротивлений  $r_A/r_{ВД}$  и  $r_B/r_{ВД}$ .

Сопротивления  $r_B$ ,  $r_A$ ,  $r_{ВД}$  и взаимная индуктивность катушки  $M$  выбираются с таким расчетом, чтобы на шкалах, по которым определяются положения движков  $a'$  и  $B'$ , можно было непосредственно отсчитывать значения величин  $\gamma'_x$  и  $\delta'_x$ .

До сих пор мы предполагали, что образцовый трансформатор тока не имеет погрешностей. В действительности они имеются у каж-

дого трансформатора. Для определения действительных погрешностей поверяемого трансформатора найденные значения погрешностей необходимо сложить с соответствующими погрешностями образцового трансформатора; таким образом, действительные погрешности поверяемого трансформатора равны:

$$\gamma_x = \gamma'_x + \gamma_0; \quad (14-5)$$

$$\delta_x = \delta'_x + \delta_0. \quad (14-6)$$

#### 14-6. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДИНАРНЫМ МОСТОМ (РАБОТА 6)

##### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их номинальные значения величин, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Зарисовать схемы имеющихся мостов, например Р338, Р316, ММВ.

4. Измерить одним из мостов сопротивление каждого из двух данных резисторов.

5. Соединить резисторы последовательно и измерить их эквивалентное сопротивление.

6. Соединить резисторы параллельно и измерить их эквивалентное сопротивление.

7. Найденные в пп. 5 и 6 значения сопротивлений проверить подсчетом по формулам

$$r'_x = r_{x1} + r_{x2}$$

и

$$r''_x = r_{x1} r_{x2} / (r_{x1} + r_{x2}).$$

8. Определить сопротивление вольтметров различных систем, применяя поочередно каждый из мостов. Сравнить найденные значения сопротивлений, полученные при измерении разными мостами. Подсчитать и сравнить мощности потерь вольтметров различных систем при номинальном напряжении ( $P_{VН} = U_{VН}^2 / r_V$ ).

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-8.

Т а б л и ц а 14-8

№ наблюдений	$r_1$	$r_2$	$r_1/r_2$	$r$	$r_x$	$U_H$	$P_H$	Примечание
	Ом	Ом	—	Ом	Ом	В	Вт	

9. Дать заключение по работе,

## 14-7. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВОЙНЫМ МОСТОМ (РАБОТА 7)

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать номинальные значения величин, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Ознакомиться детально и зарисовать схему моста.

4. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 6-27 или 6-28, и показать ее для проверки руководителю.

5. Определить сопротивления нескольких мегаллических стержней, измерить их длину и сечение и определить удельные электрические сопротивления их.

6. Определить сопротивления амперметров различных систем.

Подсчитать и сравнить мощность потерь амперметров при номинальном токе ( $P_{\text{Ан}} = I_{\text{Ан}}^2 r_{\text{А}}$ ).

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-9.

Т а б л и ц а 14-9

№ наблюдений	$r_1 = r'_1$	$r_2 = r'_2$	$r_1/r_2$	$r$	$r_x$	$l$	$S$	$\rho$	Примечание
	Ом	Ом	—	Ом	Ом	м	мм <sup>2</sup>	Ом·мм <sup>2</sup> /м	

7. Дать заключение по работе.

## 14-8. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ (РАБОТА 8)

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводы-изготовители и заводские номера.

2. Пользуясь мегомметром, определить сопротивление изоляции двухпроводной установки, не находящейся под рабочим напряжением (рис. 6-30).

Сопротивления определить: а) между каждым из проводов и землей; б) между двумя проводами.

Результаты измерений записать в табл. 14-10.

3. Включив испытуемую установку под рабочее напряжение и пользуясь вольтметром, определить сопротивление изоляции каждого из проводов относительно земли (рис. 6-33).

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-10.

4. Пользуясь мегомметром, определить сопротивление изоляции обмоток статора трехфазного двигателя (рис. 6-31, а).

№ наблюдений	Испытание мегомметром			Испытание вольтметром						Примечание
	$r_{xA}$	$r_{xB}$	$r_{xAB}$	$U$	$U_A$	$U_B$	$r_V$	$r_{xA}$	$r_{xB}$	
	Ом	Ом	Ом	В	В	В	Ом	Ом	Ом	

Сопротивления определить: а) между каждой из обмоток и корпусом (землей); б) между каждым двумя обмотками двигателя. Наблюдения записать в табл. 14-11.

Таблица 14-11

№ наблюдений	$r_{xA}$	$r_{xB}$	$r_{xC}$	$r_{xAB}$	$r_{xBC}$	$r_{xCA}$	Примечания
	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	

5. Дать заключение о состоянии изоляции.

#### 14-9. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ (РАБОТА 9)

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы. Записать номинальные значения величин приборов, системы, классы точности, заводские номера, а также заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 6-41) и показать ее для проверки руководителю.

4. Пользуясь методом амперметра и вольтметра, определить сопротивление испытуемого заземления  $r_x$ , вспомогательного заземления  $r_B$  и сопротивления зонда  $r_{зп}$ .

Результаты наблюдений и подсчета записать в табл. 14-12.

Таблица 14-12

№ наблюдений	Метод амперметра и вольтметра					Измеритель заземлений			Примечания
	$U$	$I$	$r_x$	$r_B$	$r_{зп}$	$r_x$	$r_B$	$r_{зп}$	
	В	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	

7. Дать заключение о состоянии заземления,

## 14-10. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РАБОТА 10)

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их технические данные.
2. Собрать схему (рис. 7-12) и показать ее для проверки руководителю.
3. Определить индуктивность двух данных катушек. Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-13.

Таблица 14-13

№ наблюдений	$L_0$	$r_2$	$r_4$	$L_x$	Примечания
	Г	Ом	Ом	Г	

## 14-11. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ МОСТОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РАБОТА 11)

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их технические данные.
2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.
3. Собрать схему (рис. 7-19, а) и показать ее для проверки руководителю.

4. Определить емкость двух данных конденсаторов, сначала каждого в отдельности, а затем эквивалентную емкость при последовательном и параллельном соединении их.

Значения эквивалентных емкостей проверить по формулам:

$$C'_9 = C_{1x} C_{2x} / (C_{1x} + C_{2x}) \text{ — при последовательном соединении;}$$

$$C''_9 = C_{1x} + C_{2x} \text{ — при параллельном соединении конденсаторов.}$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-14.

Таблица 14-14

№ наблюдений	$r_2$	$r_4$	$C_0$	$C_x$	Примечания
	Ом	Ом	мкФ	мкФ	

## 14-12. ПОВЕРКА ВАТТМЕТРА И СЧЕТЧИКА (РАБОТА 12)

### а) Схемы поверки

Вращающие моменты как ваттметра, так и счетчика электрической энергии пропорциональны мощности, определяемой током последовательной обмотки прибора, напряжением, приложенным

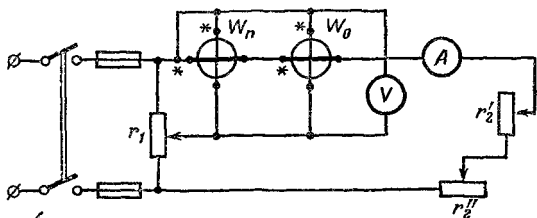


Рис. 14-8. Схема для поверки технического ваттметра с регулировкой напряжения и тока.

к его параллельной цепи, и косинусом угла сдвига фаз между указанными величинами. Поэтому схемы поверки ваттметра и счетчика по существу одинаковы.

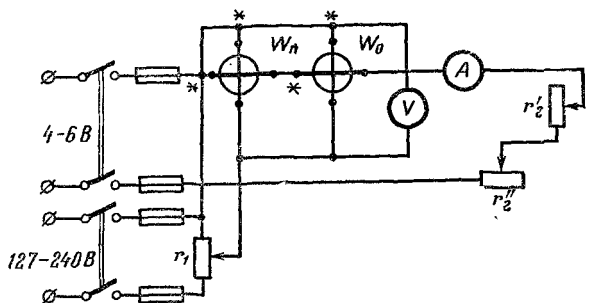


Рис. 14-9. Схема для поверки технического ваттметра с питанием цепей от разных источников.

В различных условиях схемы поверки должны обеспечить возможность регулировки каждой из указанных величин, т. е. тока  $I$ , напряжения  $U$  и угла сдвига фаз  $\phi$  между ними.

Для поверки технического ваттметра или счетчика путем сравнения показаний его с показаниями образцовых приборов можно пользоваться одной из схем, приведенных ниже (рис. 14-8—14-11).

На рис. 14-8 и 14-9 даны две схемы поверки, допускающие регулировку тока и напряжения, но в первой из них питание последовательных и параллельных цепей приборов производится от одного источника электрической энергии, а во второй — от разных



источников. Так как во второй схеме последовательная цепь с относительно большим током присоединена к источнику с малым напряжением, а параллельные цепи с малыми токами присоединены к источнику с сравнительно большим напряжением, то уменьшаются

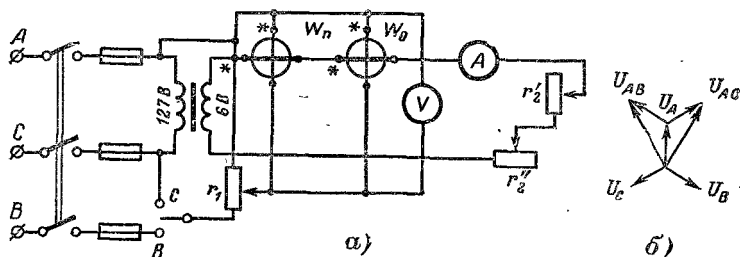


Рис. 14-10. Схема для проверки технического ваттметра при питании от трехфазной сети (а) и векторная диаграмма напряжений (б).

затраты энергии на производство поверки по сравнению с первой схемой. Кроме того, регулировочные реостаты получаются менее громоздкими.

На рис. 14-10 и 14-11 даны две схемы поверки. Первая из них позволяет произвести поверку приборов при  $\cos \varphi = 1$  и  $\cos \varphi = 0,5$ , так как параллельные цепи могут включаться на одно из

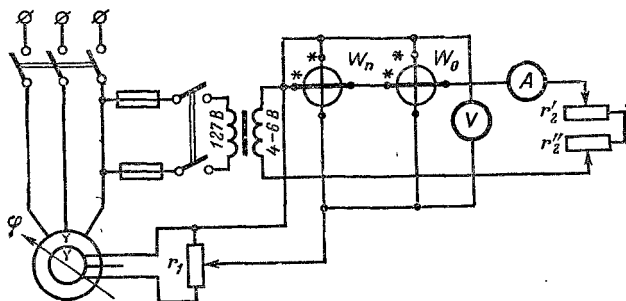


Рис. 14-11. Схема для проверки технического ваттметра при питании параллельных цепей от фазорегулятора.

линейных напряжений  $U_{AC}$  или  $U_{AB}$ . Вторая схема (рис. 14-11) вследствие применения фазорегулятора позволяет изменять угол сдвига между током и напряжением в пределах  $\pm 90^\circ$ .

Перед включением ваттметра в сеть необходимо определить зажимы последовательной и зажимы параллельной цепей ваттметра.

Определение (или проверка) зажимов производится следующим образом. Любой из зажимов ваттметра соединяют с одним зажимом рубильника (рис. 14-12). К другому зажиму рубильника присоеди-

няют провод от вольтметра, второй провод, идущий от вольтметра, поочередно присоединяют к остальным зажимам ваттметра.

Если два провода окажутся соединенными с зажимами ваттметра, принадлежащими разным обмоткам ваттметра, то цепь вольтметра будет разомкнута и показания вольтметра равны нулю.

Если два проводника окажутся соединенными с зажимами параллельной цепи ваттметра, то показания вольтметра будут

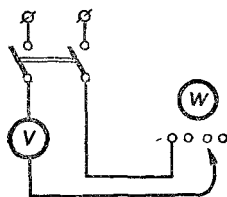


Рис. 14-12. Схема для определения зажимов ваттметра.

значительно меньше, чем напряжение сети, так как сопротивление параллельной цепи соизмеримо с сопротивлением вольтметра.

Если два проводника окажутся соединенными с зажимами последовательной цепи ваттметра, сопротивление которой мало, то вольтметр покажет напряжение сети.

### б) Поверка ваттметра

#### З а д а н и е 1

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы. Записать номинальные значения величин приборов, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме (рис. 14-10).

3. Собрать схему (рис. 14-10) и показать ее для проверки руководителю.

4. При различных нагрузках произвести поверку испытуемого ваттметра:

Т а б л и ц а 14-15

№ наблюдений	Показания приборов					Погрешности		Поправки	Примечания
	вольтметра	амперметра	ваттметра			абсолютные	процентные		
			повременного	образцового					
				ход вверх	ход вниз				
$U$	$I$	$P_{II}$	$n$	$n$	$P_0$	$\Delta P$	$\gamma$	$\delta$	
В	А	Вт	делений	делений	Вт	Вт	%	Вт	

- а) при номинальном (неизменном) напряжении;  
 б) при номинальном (неизменном) токе.  
 5. Для обоих случаев п. 4 определить абсолютные погрешности и поправки и приведенные погрешности по формулам:

$$\Delta P = P_{\text{п}} - P_0; \quad \gamma_P = (\Delta P / P_{\text{п.н}}) \cdot 100\%; \quad \delta_P = P_0 - P_{\text{п}}.$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-15.

6. По данным опыта и подсчета построить для обоих случаев п. 4 кривые поправок в зависимости от показаний поверяемого ваттметра.

7. Дать заключение о поверяемом ваттметре (гл. 14, В).

### в) Поверка счетчика

Поверка счетчика имеет целью выяснить, удовлетворяет ли счетчик техническим требованиям, предъявляемым к нему ГОСТ 6570-60.

В поверку счетчика входят: 1) проверка «самохода»; 2) проверка чувствительности; 3) определение погрешности счетчика.

Для проверки «самохода» соединяют приборы по схеме рис. 14-10, а, отключают реостат  $r_2$ , переключатель ставят в положение С, замыкают рубильник, устанавливают реостатом  $r_1$  напряжение, равное 110% номинального, и наблюдают, вращается ли диск счетчика при этих условиях.

Если диск счетчика не вращается или, сделав часть оборота или целый оборот, остановится и дальше вращаться не будет, то счетчик не имеет «самохода».

Для проверки чувствительности счетчика при номинальном напряжении на параллельной цепи счетчика, уменьшая сопротивление реостата  $r_2$ , определяют по ваттметру нагрузку, при которой счетчик начинает вращаться.

Для определения погрешности при номинальном напряжении на зажимах счетчика изменяют сопротивление реостатов  $r_2$  и устанавливают по ваттметру нагрузку 10% номинальной ( $\cos \varphi = 1$ , переключатель стоит в положении С).

При этой нагрузке за время  $t = 100 \div 120$  с отсчитывают число оборотов  $N$ , совершенное диском счетчика, отмечая ток  $I$ , напряжение  $U$  и мощность  $P$ .

Записав все значения величин, определяют действительную постоянную счетчика

$$k = Pt/N.$$

Определив постоянную счетчика  $k$  и зная номинальную постоянную  $k_{\text{н}}$ , можно определить погрешность счетчика:

$$\gamma_k = \frac{k_{\text{н}} - k}{k} \cdot 100\%.$$

Такое же определение постоянной счетчика и погрешности его производят для нагрузок 25, 50, 75 и 100% номинальной.

Точно так же производится проверка счетчика при  $\cos \varphi = 0,5$ .

Если проверка счетчика дает результаты, не удовлетворяющие техническим условиям, то производится регулировка счетчика.

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Соединить приборы по схеме рис. 14-10 или 14-11 и показать ее для проверки руководителю.

4. Определить, вращается ли диск счетчика при отсутствии нагрузки.

5. Определить чувствительность счетчика (нагрузку, при которой счетчик начинает вращаться).

6. Определить постоянную счетчика при нагрузках 10, 25, 50, 75 и 100% номинальной.

7. Определить постоянную счетчика при нагрузках, указанных в п. 6, при угле сдвига тока относительно напряжения, равном  $60^\circ$  ( $\cos \varphi = 0,5$ ).

8. Определить погрешности счетчика при указанных нагрузках.

9. Построить кривые погрешностей в зависимости от нагрузки: а) при  $\cos \varphi = 1$ ; б)  $\cos \varphi = 0,5$ .

Все наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-16.

Т а б л и ц а 14-16

№ наблюдений	U	I	P	cos φ	t	N	k	k <sub>н</sub>	γ <sub>к</sub>	Примечание
	В	А	Вт	—	с	оборотов	Втс/об	Втс/об	%	

10. Дать заключение о поверяемом счетчике.

### 14-13. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ (РАБОТА 13)

#### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Соединить приборы по схеме рис. 14-13 и показать ее для проверки руководителю.

4. При замкнутых рубильниках  $P$  и  $P_1$  при трех различных значениях тока снять показания приборов; по показаниям амперметра, вольтметра, ваттметра определить коэффициент мощности по формуле  $\cos \varphi' = P_W / (UI)$ ; определить по тригонометрическим таблицам угол  $\varphi'$  и полученные результаты сравнить с показаниями фазометра.

5. При замкнутых рубильниках  $P$  и  $P_2$  (а при необходимости и  $P_1$ ), при индуктивной нагрузке с различными углами сдвига  $\varphi$  снять показания приборов; определить  $\cos \varphi'$  по показаниям ам-

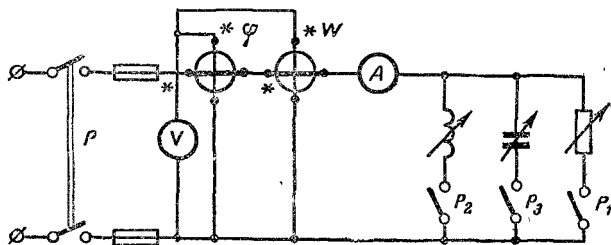


Рис. 14-13. Схема для измерения коэффициента мощности.

перметра, вольтметра и ваттметра; определить по таблице угол  $\varphi'$  и полученные результаты сравнить с показаниями фазометра.

6. При замкнутых рубильниках  $P$ ,  $P_1$  и  $P_3$  при емкостной нагрузке с различными углами сдвига  $\varphi$  повторить наблюдения и расчеты, указанные в п. 5.

Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-17.

Таблица 14-17

№ наблюдений	$U$	$I$	$\cos \varphi$	$\varphi$	$P_W$	$\cos \varphi' = P_W / (UI)$	$\varphi'$	Примечание
	В	А	—	град	Вт	—	град	

7. Дать заключение о проделанной работе.

### 14-14а. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ ВАТТМЕТРОМ (РАБОТА 14а)

#### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра (см. § 14-12).

4. Определить: а) принадлежность обмоток к отдельным элементам; б) генераторные зажимы обмоток.

5. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 14-14, и показать ее для проверки руководителю.

6. Произвести два измерения мощности при равномерной активной нагрузке; сверить показания двухэлементного ваттметра со значением мощности, определенной по показаниям амперметров и вольтметров.

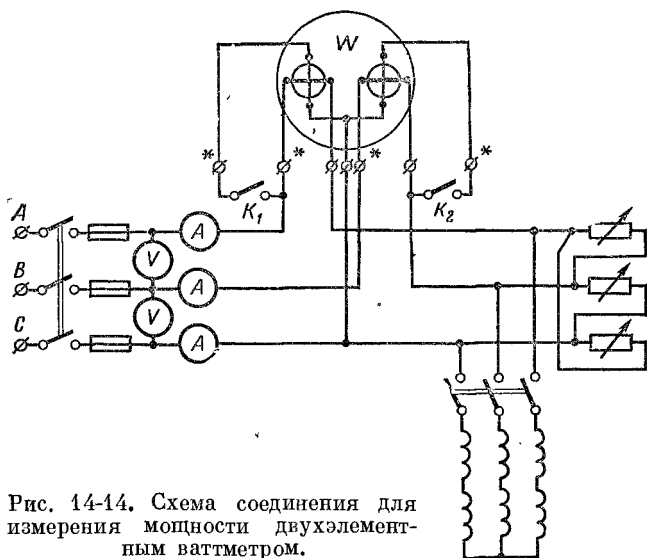


Рис. 14-14. Схема соединения для измерения мощности двухэлементным ваттметром.

Убедиться в том, что:

а)  $P'_W = P''_W$ ;

б)  $P_W = P'_W + P''_W$ ;

в)  $Q = \sqrt{3} (P'_W - P''_W) = 0$ ;

г)  $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} (P'_W - P''_W) / (P'_W + P''_W) = 0$ ,

где  $P'_W$  — мощность, учитываемая первым элементом ваттметра (отсчитывается по ваттметру при замкнутом рубильнике  $K_1$  и разомкнутом рубильнике  $K_2$ );

$P''_W$  — мощность, учитываемая вторым элементом ваттметра;

$P_W$  — показание двухэлементного ваттметра (определяется при замкнутых рубильниках  $K_1$  и  $K_2$ );

$Q$  — реактивная мощность цепи трехфазного тока.

7. Произвести два-три измерения активной мощности при равномерной нагрузке с углом сдвига  $\varphi < 60^\circ$ ,

Проверить, что  $P_W = P'_W + P''_W$ .

Определить:

а)  $\cos \varphi = P_W / (\sqrt{3} IU)$ ;

б)  $\angle \varphi$  (по косинусу угла);

в)  $Q = \sqrt{3} (P'_W - P''_W)$ ;

г)  $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} (P'_W - P''_W) / P'_W + P''_W$ ;

д)  $\angle \varphi$  (по тангенсу угла).

8. При равномерной нагрузке, изменяя реактивное сопротивление цепи, получить показание второго элемента ваттметра равным нулю ( $P'' = 0$ ) и проверить, что  $P'_W = P_W$ .

Определить все величины, указанные в п. 7.

9. При равномерной нагрузке с углом сдвига  $\varphi > 60^\circ$  произвести два измерения активной мощности. Проверить, что  $P_W = P'_W + (-P''_W) = P'_W - P''_W$ . Определить все величины, указанные в п. 7.

10. Произвести два-три измерения при неравномерной нагрузке и убедиться, что  $P_W = P'_W + P''_W$  или  $P_W = P'_W - P''_W$ .

Наблюдения и подсчеты свести в табл. 14-18.

Т а б л и ц а 14-18

№ из- брений	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U$	$P'_W$	$P''_W$	$P_W$	$Q$	$S$	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\angle \varphi$	Примечание
	А	А	А	В	Вт	Вт	Вт	вар	В·А	—	град	—	град	

### 14-146. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ ВАТТМЕТРОМ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ ТОКА (РАБОТА 146)

#### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра (см. § 14-12).

4. Определить: а) принадлежность обмоток к отдельным элементам; б) генераторные зажимы обмоток.

5. Произвести разметку зажимов (или проверить ее) у трансформаторов тока.

6. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 14-15, и показать ее для проверки руководителю.

7. Произвести два измерения мощности при равномерной активной нагрузке; сверить показания ваттметра со значением мощности, определенным по показаниям амперметров и вольтметра.

Убедиться в том, что:

а)  $P'_W = P''_W$ ;

б)  $P_W = P'_W + P''_W$ ;

в)  $P = k_H P_W$ ;

г)  $Q = k_H \sqrt{3} (P'_W - P''_W) = 0$ ;

д)  $\operatorname{tg} \varphi = Q/P = 0$ ,

где  $P'_W$  — мощность, учитываемая первым элементом ваттметра (отсчитывается по ваттметру при замкнутом рубильнике  $K_1$  и разомкнутом рубильнике  $K_2$ );

$P''_W$  — мощность, учитываемая вторым элементом ваттметра;

$P_W$  — показание двухэлементного ваттметра (определяется при замкнутых рубильниках  $K_1$  и  $K_2$ );

$P$  — активная мощность цепи трехфазного тока;

$Q$  — реактивная мощность цепи трехфазного тока.

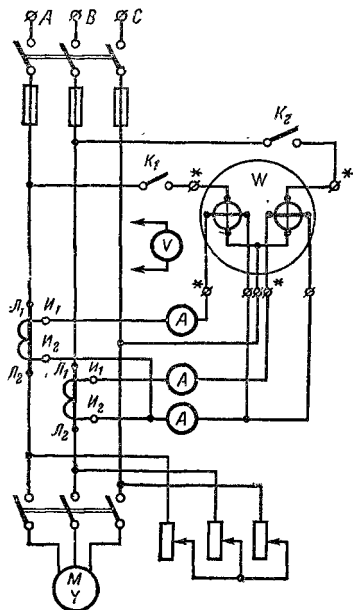


Рис. 14-15. Схема соединения для измерений мощности двухэлементным ваттметром с трансформаторами тока.

8. Произвести два-три измерения мощности при равномерной нагрузке фаз с углом сдвига  $\varphi < 60^\circ$ .

Проверить, что  $P_W = P'_W + P''_W$ .

Определить:

а)  $P = k_H P'_W$ ;

б)  $Q = k_H \sqrt{3} (P'_W - P''_W)$ ;

в)  $\cos \varphi = P_W / (\sqrt{3} IU)$ ;

г) угол  $\varphi$  (через его косинус);

д)  $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$ ;

е) угол  $\varphi$  (через его тангенс).

9. При равномерной нагрузке, изменяя реактивное сопротивление цепи, получить показание второго элемента ваттметра, равное нулю:

$$P''_W = 0;$$

проверить, что

$$P_W = P'_W.$$

Определить все величины, указанные в п. 8.

10. При равномерной нагрузке с углом сдвига  $\varphi > 60^\circ$  произвести два измерения мощности.

Проверить, что

$$P_W = P'_W + P''_W \neq P'_W - [P''_W].$$

Определить все величины, указанные в п. 8.

Таблица 14-10

№ наблюдений	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$k_H$	$U$	$P'_W$	$P''_W$	$P_W$	$P$	$Q$	$S$	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\angle \varphi$	Примечание
	А	А	А	—	В	Вт	Вт	Вт	Вт	вар	В·А	—	град	—	град	



11. Произвести два измерения мощности при неравномерной нагрузке и убедиться, что

$$P_W = P'_W + P''_W.$$

Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-19.

### 14-15. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ (РАБОТА 15)

В практике встречаются случаи неправильного соединения зажимов ваттметров (счетчиков) и измерительных трансформаторов.

Рассмотрим несколько неправильных схем включения.

1. На рис. 14-16, а дана правильная схема включения двух-элементного ваттметра через измерительные трансформаторы. Если переключить одну из обмоток второго трансформатора тока, то трансформатор тока в фазе В будет включен неправильно ( $L_1$  поставлено на место  $L_2$  или  $I_1$  на место  $I_2$ ); это влечет за собой изменение фазы тока  $I'_{ЛВ}$ , проходящего через последовательную обмотку второго элемента ваттметра, на  $180^\circ$  (рис. 14-16, б). Следовательно, ток, проходящий по последовательной обмотке второго элемента, будет сдвинут относительно приложенного к параллельной обмотке этого элемента напряжения  $U'_{BC}$  на угол  $180^\circ - (30^\circ + \varphi_B)$ . Показания двух-элементного ваттметра в этом случае будут:

$$P'_W = I'_{ЛA} U'_{AC} \cos(30^\circ - \varphi_A) + I'_{ЛB} U'_{BC} \cos(150^\circ - \varphi_B).$$

Но так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$\begin{aligned} P'_W &= I'_\Delta U' [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(150^\circ - \varphi)] = \\ &= I'_\Delta U' \cdot 2 \cos(90^\circ - \varphi) \cos 60^\circ = I'_\Delta U' \sin \varphi. \end{aligned}$$

А при правильной схеме включения ваттметр должен показать:

$$\sqrt{3} I'_\Delta U' \cos \varphi.$$

В приведенных формулах штрихами отмечены величины вторичной цепи.

Поправочный коэффициент, на который нужно множить показания включенного по такой неправильной схеме ваттметра для того, чтобы получить мощность, соответствующую показанию правильно включенного ваттметра, может быть найден из следующего соотношения:

$$\sqrt{3} I'_\Delta U' \cos \varphi = C_1 I'_\Delta U' \sin \varphi,$$

откуда

$$C_1 = \frac{\sqrt{3} I'_\Delta U' \cos \varphi}{I'_\Delta U' \sin \varphi} = \sqrt{3} \operatorname{ctg} \varphi.$$

2. Допустим, что трансформатор тока в фазе А включен неправильно:  $L_1$  включен на место  $L_2$  или, что то же,  $I_1$  на место  $I_2$  (рис. 14-16, а).

Такое неправильное включение трансформатора влечет за собой изменение фазы тока, идущего через последовательную обмотку первого элемента ваттметра, на  $180^\circ$  (см. векторную диаграмму на

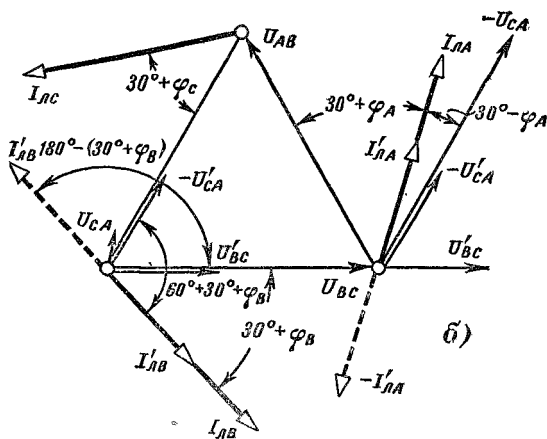
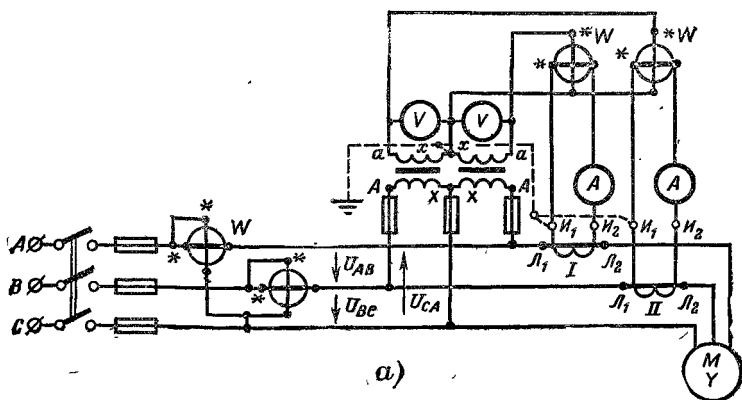


Рис. 14-16. Измерение мощности в высоковольтной трехфазной цепи.

а — схема соединения; б — векторная диаграмма.

рис. 14-16, б), и, следовательно, показания ваттметра будут определяться выражением

$$P'_W = I'_{LA} U'_{AC} \cos [180^\circ - (30^\circ - \varphi_A)] + I'_{LB} U'_{BC} \cos (30^\circ + \varphi_B)$$

а так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$\begin{aligned} P' &= I'_{\text{Л}} U' [\cos (150^\circ + \varphi) + \cos (30^\circ + \varphi)] = \\ &= I'_{\text{Л}} U' \cdot 2 \cos \frac{180^\circ + 2\varphi}{2} \cos \frac{120^\circ}{2} = I'_{\text{Л}} U' \cdot 2 \cos (90^\circ + \varphi) \cos 60^\circ = \\ &= - I'_{\text{Л}} U' \sin \varphi. \end{aligned}$$

Стрелка ваттметра отклоняется в обратную сторону (диск счетчика вращается также в обратную сторону).

Поправочный коэффициент для этого случая равен:

$$C_2 = \sqrt{3} I'_{\text{Л}} U'_{\text{Л}} \cos \varphi / (- I'_{\text{Л}} U' \sin \varphi) = - \sqrt{3} \operatorname{ctg} \varphi.$$

3. Допустим, что трансформаторы напряжения включены неправильно, а именно зажим *A* первого трансформатора приключен к проводу *B*, а зажим *A* второго трансформатора приключен к проводу *A* (рис. 14-16, *a*).

В этом случае показания двухэлементного ваттметра могут быть выражены (см. векторную диаграмму на рис. 14-16, *b*):

$$P'_W = I'_{\text{ЛA}} U'_{\text{BC}} \cos [60^\circ + (30^\circ - \varphi)] + I'_{\text{ЛB}} U'_{\text{AC}} \cos [60^\circ + (30^\circ + \varphi)],$$

а так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$P'_W = I'_{\text{Л}} U' [\cos (90^\circ - \varphi) + \cos (90^\circ + \varphi)] = I'_{\text{Л}} U' (\sin \varphi - \sin \varphi) = 0.$$

В этом случае показания ваттметра, как видим, будут равны нулю.

#### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать номинальные значения величин, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Пользуясь вольтметром, определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра.

4. Определить принадлежность отдельных обмоток к тому или иному элементу ваттметра и определить генераторные зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра.

5. Проверить правильность разметки концов трансформаторов тока и напряжения.

6. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 14-16, *a*, и показать ее для проверки руководителю.

7. Включить напряжение, произвести запись показаний всех приборов и убедиться в том, что

$$P_W = P'_W k_{\text{HI}} k_{\text{HU}},$$

где  $P_W$  — мощность трехфазной цепи, измеренная ваттметром, включенным непосредственно в первичную цепь;

$P'_W$  — показание двухэлементного ваттметра, включенного через измерительные трансформаторы;

$k_{\text{HI}}$  и  $k_{\text{HU}}$  — коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения,

8. Поменять местами зажимы первичной обмотки трансформатора тока  $II$  ( $L_1$  включить на место  $L_2$ ), записать показания приборов и убедиться в том, что

$$P'W k_H I k_{HU} C_1 = P.$$

9. Переключить зажим  $A$  первого трансформатора напряжения с провода  $A$  на провод  $B$ , а зажим  $A$  второго трансформатора напряжения переключить с провода  $B$  на провод  $A$ .

Наблюдения и подсчеты свести в табл. 14-20.

Таблица 14-20

№ наблюдений	$U'_{BC}$		$U'_{CA}$		$I'_A$		$I'_B$		$P'$	$U_{BC}$		$U_{CA}$		$I_A$		$I_B$		$P$	$P = P' k_H I k_{HU}$	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	$C$	Примечание
	В	В	В	В	А	А	ВТ	В		В	А	А	ВТ	ВТ	ВТ	ВТ	ВТ						

Включить напряжение и убедиться в том, что показание двухэлементного ваттметра, включенного через измерительные трансформаторы, равно нулю.

10. Дать заключение о выполненной работе.

### 14-16. ВКЛЮЧЕНИЕ СЧЕТЧИКОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНУЮ ЦЕПЬ (РАБОТА 16)

#### З а д а н и е

1. Ознакомиться детально с устройством счетчиков активной и реактивной энергии и записать технические данные счетчиков, снять схемы и эскизы.

2. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные значения величин, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

№ наблюдений					$Pt$	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$Q = \sqrt{3}IU \sin \varphi$	Счетчик активной энергии		
	$I$	$U$	$P$	$t$					$N'$	$k_H$	$W_a = N' k_E$
	А	В	Вт	с	Вт·с	—	—	В·А	оборотов	Вт·с/об	Вт·с

3. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

4. Определить последовательность фаз трехфазной цепи.

5. Соединить приборы по схеме на рис. 14-17 и показать ее для проверки руководителю.

6. При равномерной безреактивной нагрузке убедиться в отсутствии вращения реактивного счетчика.

7. При равномерной нагрузке за какой-либо промежуток времени  $t$  определить по счетчикам активную и реактивную энер-

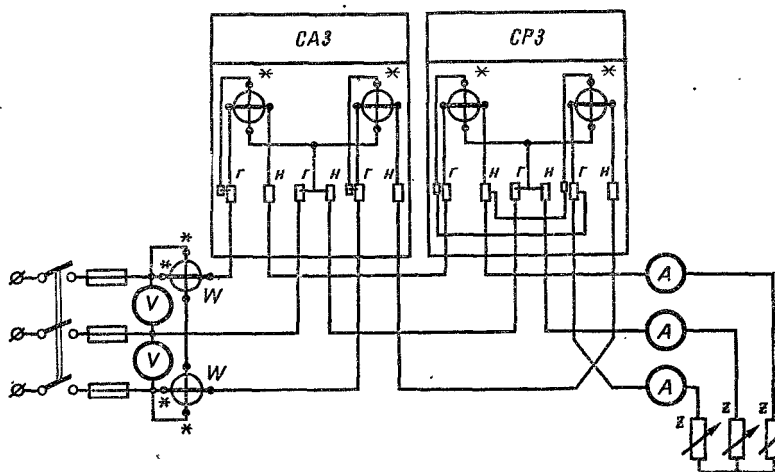


Рис. 14-17. Схема включения счетчиков активной и реактивной энергии в трехфазную цепь.

гию, израсходованную в сети, и записать показания всех приборов в табл. 14-21.

По данным наблюдений определить.

а) по показаниям ваттметров, вольтметров и амперметров

$$\cos \varphi = P_W / (\sqrt{3} IU);$$

б) по показаниям счетчика активной и реактивной энергии определить средневзвешенный коэффициент мощности установки

Таблица 14-21

$k$	$\gamma_k$	$N''$	Счетчик реактивной энергии				Примечание
			$k_H$	$W_p = N'' k_H$	$k$	$\gamma_k$	
Вт · с/об	%	оборотов	В · А · с/об	В · А · с	В · А · с/об	%	

за данный отрезок времени

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = W_a / (\sqrt{W_a^2 + W_p^2}),$$

в нашем случае коэффициент мощности цепи остается постоянным; в практике же коэффициент мощности установки изменяется, а средневзвешенный коэффициент мощности данной установки за какой-то промежуток времени определяется по приведенной формуле или через

$$\text{tg } \varphi_{\text{ср}} = W_p / W_a;$$

в) сравнить полученные значения величин;

г) определить действительную постоянную для счетчика активной энергии и его погрешность.

Действительную постоянную счетчика можно определить по формуле

$$k = P_W t / N',$$

где  $P_W$  — мощность, измеряемая ваттметрами;

$N'$  — число оборотов, сделанных диском счетчика за время  $t$ .

Погрешность счетчика можно определить по формуле

$$\gamma_k = \frac{k_n - k}{k} \cdot 100\%,$$

где  $k_n$  — номинальная постоянная;

д) определить действительную постоянную для счетчика реактивной энергии и его погрешность.

Действительную постоянную счетчика реактивной энергии можно определить по формуле

$$k = Qt / N'',$$

где  $Q$  — реактивная мощность, определяемая выражением

$$Q = \sqrt{3} IU \sin \varphi;$$

$N''$  — число оборотов, сделанных диском счетчика за время  $t$ ;

$$[\sin \varphi \text{ определяется через } \cos \varphi = P / (\sqrt{3} IU)].$$

Погрешность счетчика определяется по формуле

$$\gamma_k = [(k_n - k) / k] \cdot 100\%.$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-21.

## 14-17. ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОЛУЧЕВОГО ИЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ (РАБОТА 17)

### Описание конструкции осциллографа Н102

Осциллограф типа Н102 дает возможность одновременно производить фотозапись восьми электрических величин на пленку шириной 35 мм и вести визуальные наблюдения за изменением этих величин на его экране.

а) Панель управления

На панели управления (рис. 14-18) обозначены: 1 — зажимы для подключения гальванометров (вибраторов) и их выключатели; 2 — крышка блока гальванометров (вибраторов); 3 — рукоятки для регулировки положения гальванометров, позволяющие вывести световой указатель в пучковую точку экрана; 4 — зажимы для включения токовых цепей гальванометров мощности; 5 — крышка осветителя с контрольным указателем; 6 — ручки для регулирования щелей диафрагмы; 7 — экран для наблюдений кривых; 8 — ручки для регулирования скорости движения фотопленки; 9 — выключатель электродвигателя; 10 — кассета для фотопленки; 11 — приемная кассета; 12 — указатель запаса неиспользованной пленки; 13 — ручки для регулировки длины кадра; 14 — кнопка включения съемки и зажимы для дистанционного управления съемкой; 15 — ручка выключателя осциллографа и регулятора напряжения накала лампы осветителя; 16 — ручка для регулирования частоты вращения зеркального барабана; 17 — ручки для установки блок-контактов для коммутации в исследуемой цепи при осциллографировании быстро протекающих процессов; 18 — зажимы для включения коммутирующего устройства в исследуемую цепь, позволяющего согласовать длину осциллограммы и начало записи до момента коммутации; 19 — выключатель микрофонного отметчика времени (500 Гц), устанавливаемого в первое гнездо блока гальванометров; 20 — колодка для присоединения осциллографа к сети; 21 — колодка для переключения напряжения 127—220 В.

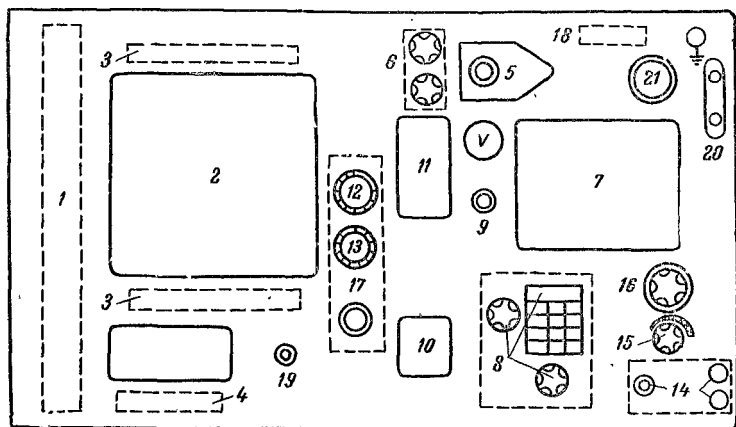


Рис. 14-18. Панель управления осциллографа Н102.

пленки; 13 — ручки для регулировки длины кадра; 14 — кнопка включения съемки и зажимы для дистанционного управления съемкой; 15 — ручка выключателя осциллографа и регулятора напряжения накала лампы осветителя; 16 — ручка для регулирования частоты вращения зеркального барабана; 17 — ручки для установки блок-контактов для коммутации в исследуемой цепи при осциллографировании быстро протекающих процессов; 18 — зажимы для включения коммутирующего устройства в исследуемую цепь, позволяющего согласовать длину осциллограммы и начало записи до момента коммутации; 19 — выключатель микрофонного отметчика времени (500 Гц), устанавливаемого в первое гнездо блока гальванометров; 20 — колодка для присоединения осциллографа к сети; 21 — колодка для переключения напряжения 127—220 В.

Для записи кривых тока и напряжения применяются петлевые и рамочные осциллографические гальванометры магнитоэлектрической системы.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть гальванометра, и угол поворота зеркала гальванометра пропорциональны току (§ 11-7),

Расчетная чувствительность гальванометра согласно (11-1)

$$S_I = \alpha/I = Blb/D.$$

Отклонение луча  $a$  на пленке или на экране зависит от угла поворота зеркала и от длины луча  $L$ , т. е.

$$a = 2kL\alpha = 2kLS_I I = S'_I I.$$

Величина  $S'_I = 2kLS_I$ , называемая паспортной чувствительностью гальванометра к току, повышается с увеличением длины луча  $L$  от зеркала до пленки (экрана).

В гальванометрах мощности ферродинамической системы обмотка электромагнита является последовательной обмоткой, которая включается в цепь тока. Петля гальванометра вместе с последовательно соединенным добавочным резистором образует параллельную цепь, которая включается под напряжением цепи. Поэтому как мгновенный вращающий момент, так и угол поворота зеркала вибратора пропорциональны мгновенной мощности.

### б) Схемы включения гальванометров (вибраторов)

Если измеряемый ток меньше допустимого тока гальванометра, то последний непосредственно включается в цепь измеряемого тока (рис. 14-19, а), в противном случае гальванометр вместе с последовательно соединенным регулировочным резистором  $r_{рег}$  включается параллельно шунту (рис. 14-19, б).

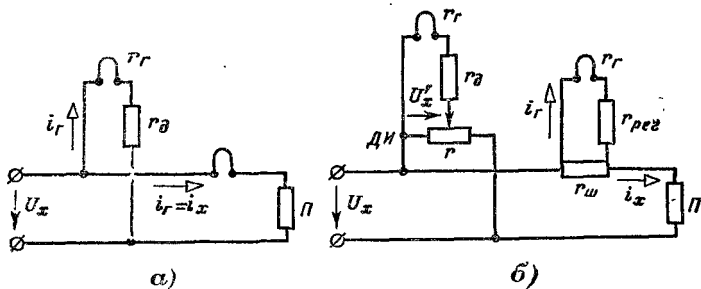


Рис. 14-19. Схемы включения осциллографических гальванометров для измерения тока и напряжения.

Ток гальванометра (вибратора)  $i_r$  определяется необходимой амплитудой отклонения луча на пленке или экране (в одну сторону) и паспортной чувствительностью гальванометра к току  $S'_I$ .

Для измерения напряжения применяются две схемы (рис. 14-19, а и б). В первой из них гальванометр (вибратор)  $r_r$  и добавочный резистор  $r_d$ , соединенные последовательно, непосредственно включаются на измеряемое напряжение  $u_x$ , при этом ток гальванометра не должен превышать допустимого значения

$$i_r = u_x / (r_r + r_d) \leq i_{в. доп}$$



откуда сопротивление добавочного резистора

$$r_{\text{д}} = (u_x / i_{\text{Г}}) - r_{\text{Г}}.$$

Во второй схеме, помимо добавочного резистора, применяется еще и делитель напряжения ДН с коэффициентом делителя  $k$ . Сопротивление добавочного резистора  $r_{\text{д}}$  определяется аналогично рассмотренному, при этом только напряжение  $u_x$  заменяется напряжением

$$u'_x = \frac{u_x}{k} = \frac{u_x}{\frac{r_{\text{д, н}}}{r}}.$$

в) Выбор и расчет гальванометров  
(вibrаторов)

Для выбора гальванометров необходимо: 1) разработать электрическую схему для исследований и рассчитать наибольшие и наименьшие значения токов и напряжений, подлежащих измерению (записи); 2) составить схему включения гальванометров; 3) выбрать типы гальванометров по паспортным данным и рассчитать все шунты, добавочные резисторы, реостаты и другие элементы схемы.

Выбираемый гальванометр должен иметь:

а) частоту собственных колебаний в 5—10 раз больше частоты исследуемой величины;

б) отклонение луча в одну сторону на пленке (экране), не превышающее допустимое ( $a < a_{\text{доп}}$ ). Ради осторожности рекомендуется брать  $a = a_{\text{доп}}/3$ ;

в) паспортный ток

$$i_{\text{Г}} = a/S'_I$$

или

$$i_{\text{Г}} = i_{\text{Г, доп}}/3,$$

при этом необходимо помнить, что при синусоидальном токе допустимое действующее значение тока гальванометра в  $\sqrt{2}$  раз меньше указанного в паспорте амплитудного значения допустимого тока.

**Пример.** В цепь с частотой  $f = 50$  Гц включен приемник энергии, действующее значение тока которого изменяется от 1 до 6 А. Требуется выбрать гальванометр, шунт и регулировочный резистор  $r_{\text{рег}}$  (рис. 14-19, б) для записи тока.

**Решение.** 1. Выбираем гальванометр типа МОВ2-IV. По данным табл. 11-1: частота собственных колебаний гальванометра  $f = 3\,000$  Гц; чувствительность на пленке  $S'_I = 1,0$  мм/мА; сопротивление гальванометра  $r_{\text{Г}} = 6,0$  Ом; максимальный допустимый ток гальванометра  $I_{\text{Г, доп}} = 2,5$  мА; допустимое отклонение луча на пленке в одну сторону  $a_{\text{доп}} = 25$  мм.

По частоте гальванометр удовлетворяет указанному выше требованию.

2. Ближайшим по току стандартным шунтом является шунт с  $I_{\text{ш, н}} = 7,5$  А и  $U_{\text{ш, н}} = 75$  мВ.

При токе в исследуемой цепи  $I = 6$  А напряжение на шунте  $U_{\text{ш}} = 6 \cdot 75/7,5 = 60$  мВ.

3. Амплитуду отклонения луча на пленке в одну сторону (соответствующую току  $I = 6$  А) согласно рекомендации выберем  $a = a_{\text{доп}}/3 = 25/3 \approx 8$  мм.

Ток гальванометра

$$I_{\Gamma} = a / (S_{\Gamma} \sqrt{2}) = 8 / (1 \sqrt{2}) = 5,67 \text{ мА.}$$

Сопротивление цепи гальванометра, подключенной к шунту,

$$r_{\text{рег}} + r_{\Gamma} = U_{\text{ш}} / I_{\Gamma} = 60 / 5,67 = 10,6 \text{ Ом.}$$

Для ограничения тока в цепи гальванометра выбираем регулируемый резистор (реостат, декадный магазин резисторов)  $r_{\text{рег}} = 10 \text{ Ом}$ .

При  $r_{\text{рег}} = 0$  ток гальванометра  $I_{\Gamma} = 60 / 6 = 10 \text{ мА} < 25 / 2$ , таким образом, безопасность работы гальванометра обеспечена. Изменение сопротивления резистора  $r_{\text{рег}}$  дает возможность плавно изменять амплитуду отклонения луча на пленке (экране) в нужных пределах.

Если необходимо проверить чувствительность вибратора к току  $S_{\Gamma}$ , то производят градуировку гальванометра по схеме, данной на рис. 14-2, б. В этом случае ток гальванометра определяется по образцовому миллиамперметру, а отклонение луча на экране контролируется по масштабной сетке или линейке.

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия осциллографа и зарисовать его оптическую схему.

2. Изучить конструкцию петлевого гальванометра, который дается разобранным, и зарисовать его устройство.

Ознакомиться с таблицей параметров гальванометров Н135 и МОВ-2 (см. § 14-7).

3. Собрать схему для градуировки гальванометра на постоянном токе (рис. 14-2, б). Для контроля тока применить миллиамперметр. Рассчитать аппаратуру в схеме включения гальванометра с учетом наибольшего допустимого для данного гальванометра тока и наибольшего допустимого отклонения луча на экране в одну сторону.

4. Подготовить осциллограф для включения в цепь, для чего необходимо:

а) выключить все выключатели гальванометров;

б) выключить выключатель осциллографа (поворотом против направления вращения часовой стрелки) и выключатель электродвигателя осциллографа;

в) установить переключатель в цепи питания трансформатора в положение, соответствующее напряжению источника питания;

г) открыть защитную крышку экрана;

д) установить в соответствующие гнезда гальванометры для записи тока или напряжения согласно схеме.

5. Произвести градуировку гальванометра по току или по напряжению, наблюдая за отклонением светового пятна на экране осциллографа. Результаты наблюдений с указанием размерностей записать в табл. 14-22.

Линейное отклонение луча определить с помощью полоски миллиметровой бумаги, линейки или по масштабной сетке экрана. По данным расчетов вычислить среднюю чувствительность гальванометра на экране к постоянному току.

Гальванометры очень чувствительны к ударам тока!

Ток	мА				
Отклонение луча на экране в одну сторону	мм				
Чувствительность гальванометра к току	мм/мА				
Средняя чувствительность к постоянному току	мм/мА				

Поэтому перед их включением необходимо установить движки реостатов в положения, соответствующие минимальным значениям тока в цепи гальванометра. Затем, плавно изменяя положение движков реостатов или уменьшая сопротивление в цепи гальванометра, получить отклонения луча на экране, равные 10, 20, 30, 40, 50 мм, но не более.

6. Собрать схему согласно рис. 14-20 для наблюдения кривых тока и напряжения в цепи  $r$ ,  $L$  и  $C$  при изменении параметров ( $L$  или  $C$ ). Рассчитать значения  $r_{ш}$ ,  $r_{д1}$  и  $r_{д2}$ , максимальный ток в цепи гальванометра при выбранном напряжении питания и для определенных отклонений светового пятна на экране, не превышающих 50—60% допустимой амплитуды отклонения для данного типа гальванометров. Схемы и расчеты показать для проверки руководителю.

7. Провести визуальное наблюдение на экране кривых тока и напряжения в цепи, обратив внимание на изменение амплитуды и фазы тока при изменении параметров цепи. Результаты наблюдений зарисовать в отчет в виде трех осциллограмм при  $\varphi > 0$ ,  $\varphi = 0$ ,  $\varphi < 0$ .

Методические указания к работе с осциллографом:

1. Перед включением осциллографа в сеть необходимо выполнить все указания согласно п. 4 настоящей работы.

2. Включить осциллограф в сеть и, включив выключатель (рукоятка поворачивается по часовой стрелке), плавно увеличивать напряжение накала лампы до 3—4 В.

3. Ширину щели диафрагмы при визуальном наблюдении рекомендуется установить 0,2—0,3 мм (по шкале).

4. Поворачивая с помощью приспособления гальванометр в гнезде, вывести (при отключенном гальванометре) световой указатель-луч на середину экрана. Луч может оказаться и вне пределов экрана, что зависит от положения зеркального барабана. Тогда необходимо немного повернуть зеркало, включив на короткий промежуток электродвигатель,

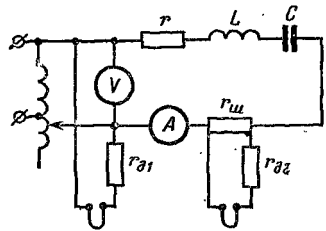


Рис. 14-20. Схема соединения для наблюдений кривой тока и напряжения в цепи  $r$ ,  $L$ ,  $C$ ,

в виде трех осциллограмм при

5. Установить реостатом и резисторами минимальный ток в цепи гальванометра, включить выключатель гальванометра и наблюдать за отклонением луча. Убедиться в правильности регулировки тока в цепи гальванометра. Такую проверку необходимо выполнить для каждого вибратора.

6. При выполнении градуировки гальванометра по току или по напряжению предпочтительно иметь схемы включения гальванометров с возможностью плавной регулировки тока в них. При выборе схем необходимо учитывать, чтобы ток гальванометра (угол отклонения зеркала) был пропорционален измеряемой величине ( $I_x$  или  $U_x$ ). В цепях переменного тока при использовании измерительных трансформаторов тока и напряжения возможны погрешности по току, напряжению и по фазе (из-за неточности передачи измеряемых величин).

7. Для визуального наблюдения рекомендуется при отключенном двигателе установить скорость записи 500 мм/с. Для лучшей видимости наблюдаемых кривых на экране можно предусмотреть затемнение помещения или закрыть экран от внешних источников света.

8. Для того чтобы увидеть на экране неподвижные кривые тока и напряжения, необходимо при включенном электродвигателе правильно установить частоту вращения зеркального барабана (частота вращения барабана должна соответствовать частоте исследуемого процесса). Это достигается вращением рукоятки магнитоиндукционного регулятора скорости.

9. При наблюдении и записи величин и их фазовых соотношений надо правильно включать гальванометры с учетом полярности. В противном случае может иметь место сдвиг по фазе не на угол  $\phi$ , а на угол  $(\pi + \phi)$ . К осциллографу комплектно поставляется специальный магазин шунтов и добавочных резисторов, позволяющий подключать одновременно восемь гальванометров для записи тока или напряжения. К магазину прилагаются восемь соединительных штепсельных вилок с разметкой однополярных штекеров. Схема устройства и применение магазина типа Р-1 должны быть рассмотрены особо.

10. Следует соблюдать осторожность при работе с осциллографом и гальванометрами. Необходимо помнить, что подготовка к работе, расчет аппаратуры и схемы, выбор гальванометров должны выполняться с предельной тщательностью. При выполнении исследований на подготовительные и расчетные операции отводится 80—90% времени. После окончания записи или визуального наблюдения исследуемого процесса гальванометры сразу же отключать.

Во время выполнения лабораторной работы с осциллографом и особенно при исследованиях в условиях производства необходимо строго соблюдать правила техники безопасности. Включение гальванометров в цепи высокого напряжения без особых защитных мер недопустимо.

#### 14-18. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИЛИ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ (РАБОТА 18)

На рис. 14-21 дан внешний вид электронного осциллографа типа ЭО-7. На передней стороне его, кроме экрана, укреплена панель управления. Осциллограф присоединяется к сети переменного

тока (127—220 В) при помощи соединительного провода, контакты для которого расположены на задней стороне осциллографа. На панели управления расположены ручки управления.

Ручкой выключателя 1 производится включение осциллографа в сеть; при этом загорается сигнальная лампочка Л.

Ручка Яркость 2 связана с движком реостата  $r_1$  (рис. 11-11); при ее повороте изменяется потенциал управляющего электрода

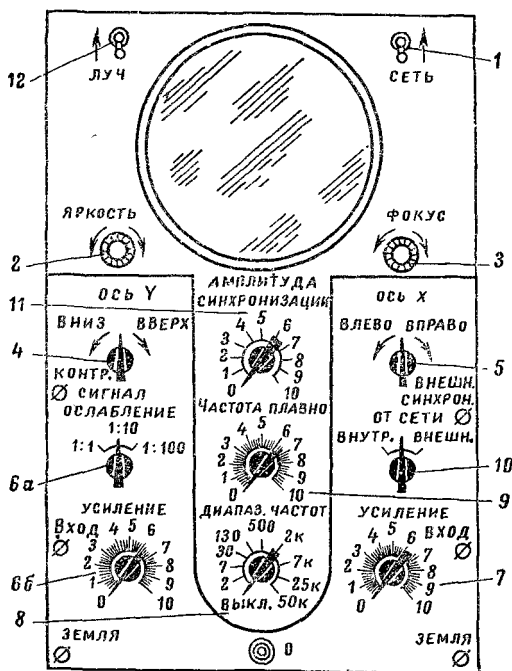


Рис. 14-21. Внешний вид электронного осциллографа.

и изменяется количество электронов в луче, т. е. изменяется яркость пятна на экране.

Ручка Фокус 3 связана с движком реостата  $r_2$  (рис. 11-11), при ее повороте изменяется потенциал первого анода  $A_1$  и фокусное расстояние.

Ручка Ось Y 4 и ручка Ось X 5 (рис. 14-22) связаны с движками 4 и 5 делителей напряжения  $r_2, r_2$ . При изменении положений движков (при повороте ручек 4 и 5) изменяются потенциалы отклоняющих пластин, изменяются напряженности поля между пластинами и, следовательно, электронный луч изменяет свое положение на экране, смещаясь соответственно по оси Y или по оси X.

Ручка Ослабление 6а связана с ножом переключателя входного делителя напряжения. При положении ручки 1 : 1 на входные за-

жимы может быть подано переменное напряжение с действующим значением не более 2,5 В; при положении ручки 1 : 10 напряжение на входные зажимы может быть подано не более 25 В и при положении ручки 1 : 100 соответственно не более 250 В.

Ручка *Усиление 6б* (вертикальное) связана с движком делителя напряжения. В зависимости от исследуемого напряжения большая или меньшая доля его, определяемая положением движка делителя, подается на сетку электронной лампы усилителя. Выходной зажим усилителя соединяется с зажимом 1 (рис. 14-22), который соединен с отклоняющей пластиной  $P_1$  электроно-лучевой трубки.

Таким образом, положением ручек *6а* и *6б* можно в широких пределах изменять отношение между исследуемым напряжением, подведенным к зажимам *Вход — Земля*, расположенным на левой

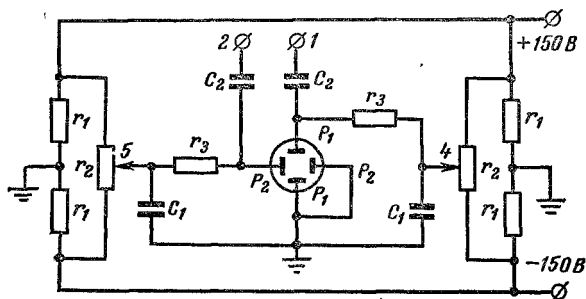


Рис. 14-22. Схема регулировки потенциалов отклоняющих пластин.

стороне панели, и напряжением, получаемым на отклоняющих пластинах  $P_1$ .

Ручка *Усиление 7* (горизонтальное) связана с движком второго делителя напряжения, соединенного со своим усилителем. Ручкой 7, так же как и ручкой *6б*, можно изменять соотношение между напряжением, подведенным к зажимам *Вход — Земля*, расположенным на правой стороне панели, и напряжением, получаемым на отклоняющих пластинах  $P_2$  (зажим 2 на рис. 14-22).

Ручкой *Диапазон частот 8* можно изменять емкость  $C$  генератора пилообразного напряжения (рис. 14-23), изменяя скорость зарядки конденсатора, а следовательно, частоту пилообразного напряжения.

Ручкой *Частота плавно 9* можно изменять сопротивление резистора, через который происходит заряд конденсатора в генераторе пилообразного напряжения (рис. 14-23), изменяя скорость зарядки конденсатора, а следовательно, и частоту пилообразного напряжения.

Ручка *10* может быть установлена в три положения: *Внутренняя*, *От сети* и *Внешняя*.

Для получения неподвижного изображения исследуемого напряжения на экране осциллографа необходимо, чтобы период пилообразного напряжения был в точности равен периоду исследуемого напряжения или был в целое число раз меньше его. Если это условие

не будет удовлетворено, то изображение кривой на экране будет перемещаться с тем большей скоростью, чем в большей степени будет нарушено указанное условие. Генераторы пилообразного напряжения имеют низкую устойчивость в отношении частоты.

Для получения неподвижного изображения необходима синхронизация генератора пилообразного напряжения с исследуемым напряжением или с напряжением какого-либо постороннего источника напряжения, например с частотой сети, от которой питается осциллограф.

Синхронизирующее напряжение подается на сетку тиратрона генератора пилообразного напряжения через трансформатор

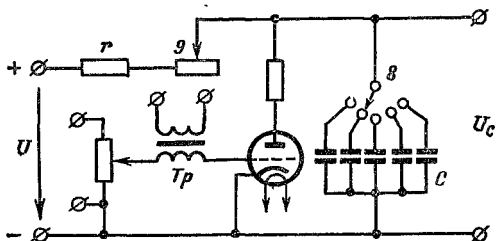


Рис. 14-23. Схема генератора пилообразного напряжения.

(рис. 14-23), вызывая отпирание или запирацию тиратрона с определенной частотой и тем самым выполняя синхронизацию.

Ручка управления 10 при синхронизации от исследуемого напряжения ставится в положение *Внутренняя*; при синхронизации с напряжением сети, от которого питается осциллограф, — в положение *От сети*; при синхронизации с внешним источником, который должен быть присоединен к зажимам *Внешняя синхронизация* и *Земля*, — в положение *Внешняя*.

Ручка *Амплитуда синхронизации* 11 регулирует амплитуду синхронизирующего напряжения, которая должна быть тем больше, чем больше отличается частота генератора от частоты синхронизирующего напряжения.

Ручка выключателя *Луч* 12 служит для выключения электронного луча. Яркое сфокусированное пятно, вызванное электронным лучом, нельзя оставлять на экране неподвижным во избежание обесцвечивания экрана.

### З а д а н и е

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать номинальные значения их параметров, классы точности, системы, заводские номера, заводы-изготовители и другие данные.

2. Установить ручки управления: 1 — выключен; 2, 3, 4, 5 — средние положения; 6а — положение 1:100; 6б и 7 — нулевые положения; 8 — положение 30—130; 9 — нулевое положение; 10 — внутренняя; 11 — положение 2—3; 12 — положение включен.

3. Собрать схему (рис. 14-24), присоединить зажимы осциллографа *Вход* и *Земля*, расположенные с левой стороны панели, к зажимам 1—1 и показать ее руководителю.

4. Присоединить цепь питания осциллографа к сети переменного тока; поворотом ручки выключателя 1 включить его.

5. После появления на экране осциллографа светлого пятна, воздействуя на ручки 2 — *Яркость* и 3 — *Фокус*, получить сфокусированное яркое пятно.

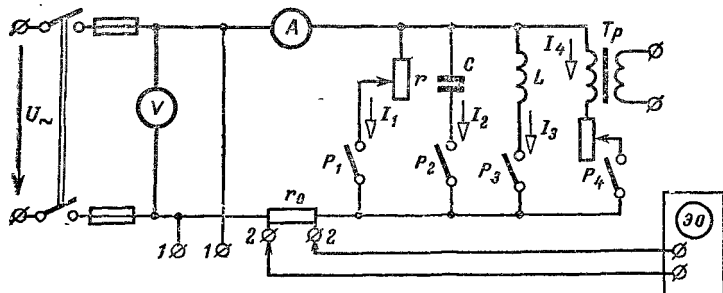


Рис. 14-24. Схема включения электронного осциллографа.

6. Пользуясь ручками 4 — *Ось Y* и 5 — *Ось X*, установить пятно в центре экрана.

7. Замкнуть двухполюсный рубильник (рис. 14-24).

8. Поворотом ручки 6б подобрать такое усиление, при котором вертикальная линия на экране, соответствующая сумме положительной и отрицательной амплитуд напряжения, была бы равна примерно половине диаметра экрана. Измерить длину этой линии (*AB*), измерить вольтметром напряжение *U* и определить масштаб напряжения

$$m_U = 2\sqrt{2} U / (AB).$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-23.

Таблица 14-23

№ наблюдений	Элемент цепи	<i>U</i>	<i>AB</i>	<i>m<sub>U</sub></i>	<i>I</i>	<i>AO</i>	<i>m<sub>I</sub></i>	<i>I<sub>m</sub></i>	<i>k<sub>Ф</sub> = I<sub>m</sub>/I</i>
		В	мм	В/мм	А	мм	А/мм	А	—
1	Реостат								
2	Конденсатор								
3	Катушка								
4	Трансформатор								

9. Оперирруя ручками управления 7 и 9, получить устойчивую неподвижную кривую исследуемого напряжения сначала в пределах одного периода, а затем в пределах двух периодов. Зарисовать кривые напряжения.



Если получить устойчивую неподвижную кривую не удастся, ручку 10 поставить в положение *От сети* и получить неподвижную кривую.

10. Переключить осциллограф с зажимов 1—1 на зажимы 2—2 (рис. 14-24) и при замкнутом рубильнике  $P_1$  получить кривую напряжения на зажимах резистора  $r_0$ , которая в другом масштабе будет являться кривой тока первой параллельной ветви.

Измерив амперметром ток  $I_1$  и амплитуду кривой тока на экране осциллографа ( $AO$ ), определить масштаб тока:

$$m_I = \sqrt{2} I_1 / (AO).$$

Зарисовать кривую тока.

11. Замкнуть рубильник  $P_2$  (при разомкнутых однополюсных рубильниках), получить на экране кривую тока  $I_2$  в цепи конденсатора и зарисовать ее. Измерить действующее и амплитудное значение тока  $I_2$ .

12. Замкнуть сначала рубильник  $P_3$ , а затем  $P_4$  (при разомкнутых остальных однополюсных рубильниках), получить кривые токов  $I_3$ , а затем  $I_4$ . Зарисовать кривые токов и измерить действующие и амплитудные значения токов и определить коэффициенты формы кривых.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 14-23.

#### 14-19. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ВОЛЬТМЕТРА (РАБОТА 19)

##### З а д а н и е

1. Ознакомиться со схемой (рис. 14-25) и с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать номинальные зна-

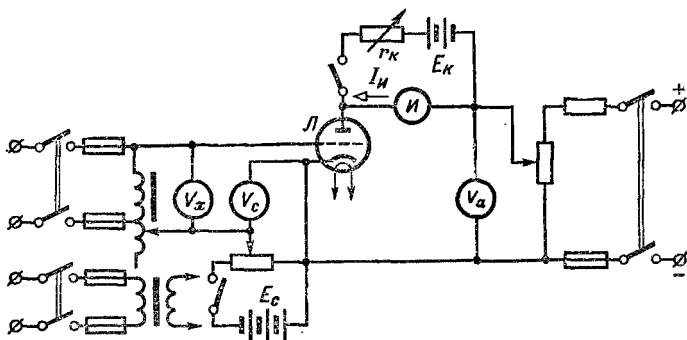


Рис. 14-25. Схема для исследования работы электронного вольтметра.

чения их параметров, классы точности, системы, заводские номера, заводы-изготовители и другие технические данные.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 14-25) для исследования электронного вольтметра и показать ее для проверки руководителю.

4. Снять четыре градуировочные характеристики  $I_{II} = f(U_x)$  для двух заданных значений напряжения смещения  $U_C$  при двух различных значениях анодного напряжения  $U_a$ . Перед снятием каждой характеристики записать начальный ток  $I_0$  при  $U_a = 0$ . Затем определить сопротивление резистора  $r_K$  в цепи дополнительного источника  $E_K$  для компенсации тока  $I_0$  и, уменьшая  $r_K$  до найденного значения, установить стрелку миллиамперметра на нулевую отметку шкалы.

Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-24.

Таблица 14-24

$U_{a1} =$						$U_{a2} =$					
$U_C$	$I_0$	$E_K$	$r_K$	$U_x$	$I_{II}$	$U_C$	$I_0$	$E_K$	$r_K$	$U_x$	$I_{II}$
В	А	В	Ом	В	А	В	А	В	Ом	В	А

5. Построить градуировочные кривые  $I_{II} = f(U_x)$ . Кривые для каждого значения анодного напряжения строить в одних осях координат.

6. Вычертить шкалу для указанных руководителем значений анодного и сеточного напряжения.

7. Дать заключение о вольтметре.

## 14-20. ИЗУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ВОЛЬТМЕТРА (РАБОТА 20)

### Задание

1. Записать основные технические данные цифрового вольтметра.

2. Ознакомиться с устройством и схемой цифрового вольтметра и нарисовать его структурную схему.

3. Ознакомиться с отдельными узлами и блоками вольтметра.

4. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной работе.

5. Использовать цифровой вольтметр в качестве образцового для проверки технического показывающего вольтметра с непрерывным отсчетом.

6. Собрать схему (рис. 14-4) и показать ее для проверки руководителю.

7. Включить схему под напряжение и произвести проверку данного прибора. Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-2.

8. Дать заключение о работе.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ  
ПО ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРАМ

Номер и год выпуска	Наименование стандарта
ГОСТ 16263-70	Метрология. Термины и определения
ГОСТ 1845-69	Приборы электроизмерительные. Общие технические условия
ГОСТ 8714-69	Амперметры и вольтметры. Технические требования
ГОСТ 8623-60	Приборы электроизмерительные. Сопротивления добавочные взаимозаменяемые. Технические требования
ГОСТ 8042-61	Шунты калиброванные
ГОСТ 1954-64	Нормальные элементы (меры э. д. с.)
ГОСТ 6864-69	Катушки электрического сопротивления измерительные
ГОСТ 7003-64	Магазины сопротивлений измерительные
ГОСТ 9999-62	Приборы электроизмерительные самопишущие
ГОСТ 7324-68	Гальванометры постоянного тока
ГОСТ 9245-68	Потенциометры постоянного тока измерительные
ГОСТ 6570-60	Счетчики электрические переменного тока
ГОСТ 7746-68	Трансформаторы тока
ГОСТ 1983-63	Трансформаторы напряжения
ГОСТ 9032-69	Трансформаторы измерительные лабораторные
ГОСТ 9763-67	Приборы электронные измерительные

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курс электрических измерений. Под ред. В. Т. Прыткова и А. В. Талицкого. М., Госэнергоиздат, 1960.
2. Электрические измерения. Под ред. А. В. Фремке. М., Госэнергоиздат, 1963.
3. Арутюнов В. О. Электрические измерительные приборы и измерения. М., Госэнергоиздат, 1958.
4. Туричин А. М. Электрические измерения. М., Госэнергоиздат, 1961.
5. Электрические измерения. Под ред. Е. Г. Шрамкова. М., «Высшая школа», 1972.
6. Вострокнутов Н. Г. Электрические измерения. М., «Высшая школа», 1966.
7. Магаршак Б. Г. Электрические измерения. М., Судпромгиз, 1962.
8. Мамонов П. Н. Сборник задач по электрическим измерениям. М., Судпромгиз, 1962.
9. Писаревский Э. А. Электрические измерения и приборы. М., «Энергия», 1970.
10. Грибанов Ю. И. Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений. М., Госэнергоиздат, 1962.
11. Арутюнов В. О. Расчет и конструкции электроизмерительных приборов. М., Госэнергоиздат, 1956.
12. Маликов С. Ф. Введение в технику измерений. М., Машгиз, 1952.
13. Маликов С. Ф. и Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., Изд-во стандартов, 1966.
14. Карандеев К. Б. Методы электрических измерений. М., Госэнергоиздат, 1952.
15. Карандеев К. Б. Мостовые методы измерений. М., Гостехиздат, УССР, 1953.
16. Алексеева И. Д. Электрические и магнитные измерения на железнодорожном транспорте. М., «Транспорт», 1965.
17. Илюкович А. М. Электрические счетчики. М., Госэнергоиздат, 1963.
18. Вострокнутов Н. Г. и Илюкович А. М. Испытание электрических счетчиков. М., Госэнергоиздат, 1961.
19. Магнитные измерения. Под ред. Е. Т. Чернышева. М., Изд-во Комитета стандартов, 1969.
20. Сербиновский Г. В. и Федотов Б. Н. Организация учета электрической энергии. М., Госэнергоиздат, 1953.
21. Власов М. Ф., Пигин С. М. и Червяков В. И. Сборка и регулировка электроизмерительных приборов. М., Госэнергоиздат, 1955.
22. Буловский П. И. и Поваляев А. В. Технология сборки и электроизмерительных приборов. М., Оборонгиз, 1955.
23. Шилоносков М. А. Электрические контрольно-измерительные приборы (ремонт и испытания). М., Машгиз, 1955.
24. Темников Ф. Е. Автоматические регистрирующие приборы. М., Машгиз, 1954.
25. Пальм А. П. Регистрирующие приборы. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
26. Стекольников И. А. Электронный осциллограф. М., Госэнергоиздат, 1949.

27. Бурьянов Б. П. Магнитоэлектрический осциллограф. М., Госэнергоиздат, 1952.
28. Малов В. С. Телемеханика в энергетических системах. М., Госэнергоиздат, 1955.
29. Лурье А. И. Электрические измерения в сетях сильного тока. М., Госэнергоиздат, 1948.
30. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М., Госэнергоиздат, 1962.
31. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М., «Энергия», 1966.
32. Корндорф С. Ф., Бернштейн А. С. и Ярославский М. И. Радиоизмерения. М., Госэнергоиздат, 1956.
33. Митин Г. П. Эксплуатация электроизмерительных приборов. М., Госэнергоиздат, 1959.
34. Барзилович В. М. Высоковольтные трансформаторы тока. М., Госэнергоиздат, 1962.
35. Куликовский Л. Ф. Автоматические преформационные измерительные приборы. М., «Энергия», 1966.
36. Шкурин Г. П. Справочник по электро и электронно-измерительным приборам. М., Военное издательство, 1972.
37. Справочник по электроизмерительным приборам. Под ред. К. К. Илюгина. М., «Энергия», 1973.
38. Электроизмерительные приборы, номенклатурный справочник. Отделение научно-технической информации по приборостроению, средствам автоматизации и системам управления, 1965.
39. Мартыненко Н. В. Щитовые электроизмерительные приборы. Вып. 1. М., «Энергия», 1963.
40. Цветков П. И. Переносные амперметры и вольтметры постоянного тока. Вып. 2. М., «Энергия», 1963.
41. Минц М. Б. Магнитоэлектрические гальванометры. Вып. 3. М., «Энергия», 1963.
42. Червяков В. И. Термоэлектрические приборы. Вып. 4. М., «Энергия», 1963.
43. Городовский А. Ф. Мосты постоянного тока. Вып. 5. М., «Энергия», 1964.
44. Илюкович А. М. Электрические счетчики постоянного тока. Вып. 6. М., «Энергия», 1963.
45. Векслер М. С. Электростатические приборы. Вып. 7. М., «Энергия», 1964.
46. Ходеев И. К. Переносные амперметры, вольтметры и ваттметры переменного тока. Измерительные комплексы. Вып. 8. М., «Энергия», 1964.
47. Нижний С. М. Мосты переменного тока. Вып. 10. М., «Энергия», 1968.
48. Хлестунов В. Н. Цифровые электроизмерительные приборы. Вып. 12. М., «Энергия», 1967.
49. Чечурина Е. Н. Приборы для измерения магнитных величин. Вып. 13. М., «Энергия», 1969.
50. Таранюк В. А. Переносные многопредельные комбинированные приборы. Вып. 14. М., «Энергия», 1970.
51. Илюкович А. М. Измерение больших сопротивлений. Вып. 15. М., «Энергия», 1971.
52. Афанасьев Г. Я., Мальцев Ю. С. Цифровые измерительные приборы промышленного назначения. Вып. 16. М., «Энергия», 1972.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

### А

Абсолютная погрешность 7  
 — поправка 10  
 Активная мощность 233, 234, 244  
 Ампер 15, 19  
 Амперметры 27, 70, 76, 93, 96, 99, 101  
 Аналоговые приборы 141  
 Астатический механизм 57, 62

### Б

Баллистический гальванометр 86, 299, 302  
 Бифилярная намотка 21

### В

Вариометр 25  
 Ваттметр, включение через измерительные трансформаторы 239, 241, 255  
 — двухэлементный 247  
 — постоянная 236  
 — трехэлементный 245  
 — ферродинамический 237  
 — электродинамический 231, 233  
 Весовой коэффициент 143  
 Взаимная индуктивность, измерение 217, 227  
 — катушка 24, 25  
 Вибрационная система 28  
 Вибрационный гальванометр 90  
 Вихревые токи 41, 64  
 Внешнее критическое сопротивление гальванометра 85  
 Воздушный успокоитель 41  
 Вольтметры 70, 76, 93, 96, 99, 101, 104, 105, 169  
 Вращающий момент 33, 35  
 Выпрямительная система 35, 93

### Г

Габаритные размеры приборов 31  
 Гальванометр 79, 86, 88

Гальванометр баллистический 86  
 — вибрационный 90  
 — выбор 91  
 — дифференциальный 86  
 — зеркальный 80, 82  
 — чувствительность к напряжению 85  
 — — — току 81  
 Гальванометрический усилитель 92

Генератор линейно-периодического напряжения 158  
 — образцовой частоты 159  
 — пилообразного напряжения 296  
 — ступенчатого напряжения 158  
 — тактовых импульсов 157  
 Генераторные зажимы 231  
 Гистерезис, петля 307  
 — потери 317

### Д

Двоичная система счисления 143  
 Двухэлементный ваттметр 247  
 — счетчик 264  
 Действительная постоянная счетчика 260  
 Действительное значение величины 7  
 Декадный магазин сопротивления 23  
 Делитель напряжения 134, 135  
 Десятичная система счисления 142  
 Дешифраторы 164  
 Динамическая устойчивость трансформатора тока 124  
 Дифференциальный гальванометр 86  
 — метод измерения 8  
 Добавочное сопротивление (резистор) 74  
 Добротность катушки 24  
 Дополнительная погрешность прибора 42  
 Допустимая погрешность 10, 42

## Е

- Единицы электрических величин 15, 16, 17
- Емкость, измерение 218, 219, 220, 228

## З

- Заземление 209
- Замещения, метод измерения 193
- Зеркальная шкала 39
- Зеркальный гальванометр 79, 88
- отчет 80

## И

- Измерение взаимной индуктивности 217, 227
- емкости 218, 219, 220, 228
- индуктивности 215, 216, 223
- магнитного потока 299, 301
- магнитной индукции 302
- мощности 230
- напряжения 174
- напряженности магнитного поля 302
- потеря в стали 317, 319
- сдвига фаз 172, 271, 273
- сопротивлений 181
- тока 174
- частоты 172, 275, 277, 278, 279
- энергии 256
- Измеритель заземлений 211, 212, 213

- Измерительная цепь (схема) 33
- Измерительные клещи 126
- трансформаторы 110
- Измерительный прибор 6
- Изоляция приборов 44
- Индикаторная лампа 168
- Индуктивные преобразователи 329
- Индукционная система 64
- Индукционные преобразователи 334

## К

- Каскадный трансформатор напряжения 116
- — тока 126
- Катушка взаимной индуктивности 24
- сопротивления 20

- Квант 142
- Кваптование 142
- Кельвин 15
- Керн 34
- Килограмм 15
- Классификация приборов 26
- Классы точности трансформаторов напряжения 116
- — — тока 127
- — электроизмерительных приборов 42
- Ключи 151
- Кодирование 142
- Кодирующие преобразователи 146
- Компенсационный метод измерения напряжения 128
- Контроль изоляции в цепях трехфазного тока 206
- Корректор 34
- Косвенный метод измерения 8
- Коэффициент добротности 38
- мощности 271
- трансформации трансформатора напряжения 112
- — — тока 119
- Кривая намагничивания 307
- Критическое сопротивление 85

## Л

- Лабораторные работы 337
- Лентопротяжный механизм 282
- Линейный мост 197
- Логические элементы 151, 152
- Логометры 52, 56, 60, 62, 64

## М

- Магазин емкостей 26
- индуктивностей 25
- сопротивлений 22
- Магнитные единицы 17
- Магнитный шунт 49
- Магнитоиндукционный успокоитель 41
- Магнитоэлектрическая система 47
- Магнитоэлектрический вибрационный гальванометр 90
- гальванометр 79
- измерительный механизм 47
- прибор 76
- счетчик 270
- Манганин 20
- Мгновенная мощность 290

Мегомметр 185, 188  
Международная система единиц (СИ) 15, 17  
Мера взаимной индуктивности 24  
— емкости 25  
— индуктивности 24  
— сопротивления 20  
— э. д. с. 19  
Метод замещения 8, 193  
— косвенный 8  
— непосредственной оценки 8  
— пулевой 8  
— петли 207  
— прямой 7  
— сравнения 8  
Метр 15  
Момент вращения 33  
— компенсирующий трение 261, 262  
— противодействующий 33  
— трения 36  
— устанавливающий 36  
Мост двойной 199  
— для измерения взаимной индуктивности 227  
— — — емкости 228  
— — — частоты 279  
— линейный (реохордный) 197  
— неуравновешенный 198  
— одинарный 195  
— переменного тока, условия равновесия 221  
— с автоматическим уравновешиванием 199  
— шестиплечий 226  
Мощность активная 234  
— потеря 45  
— реактивная 236

## Н

Нагрузочная кривая счетчика 262  
Номинальная мощность трансформатора 114, 121  
— пагрузка трансформатора 121  
Нормальный элемент 19  
Нулевая точка искусственная 245  
Нулевой метод 8

## О

Обозначения на приборах 28, 29, 30

Образцовая катушка взаимной индуктивности 24  
— — индуктивности 24  
— — сопротивления 20  
— мера 6  
Образцовый измерительный прибор 6  
— конденсатор 25  
Объемное сопротивление 184, 185  
Одинарный мост 194  
Омметр 185  
Опорные элементы 156  
Определение кривой гистерезисного цикла 307  
— места повреждения изоляции 207  
— потеря в стали 317  
Оптическая система осциллографа 289  
Основная погрешность прибора 10  
Осциллограф электромеханический 286  
— электронный 292  
Отклонение катодного луча 294  
Отметчик времени 288  
Относительная погрешность измерения 7  
Отсчетное устройство 39  
Отсчетные устройства цифровые 167  
Охранное кольцо 184, 185

## П

Перегрузочная способность прибора 44  
Передаточное число счетчика 261  
Периодное сопротивление 182  
Период колебания гальванометра 84  
Пермеаметр 308  
Поверхностное сопротивление 184  
Повреждение изоляции ливни 207  
Погрешность абсолютная 7  
— дискретности 142  
— дополнительная 42  
— измерения 7  
— основная 10  
— относительная 7  
— приведенная 10  
— систематическая 9



Погрешность случайная 10  
— температурная 77  
— трансформаторов 112, 119  
— угловая 112  
Подпятник 34, 37  
Поправка 10  
Постоянная ваттметра 236  
— времени катушки сопротив-  
ления 21, 22  
— гальванометра 36, 87, 88,  
90  
— действительная 260  
— номинальная 261  
— пояса 305  
— прибора 36  
— счетчика 260  
— флюксметра 302  
Потенциометр 130  
— автоматический 135  
— переменного тока 137  
— постоянного тока 130  
Потери в стали 317  
Преобразователи емкостные 330  
Преобразователи индуктивные  
329  
— индукционные 334  
— пьезоэлектрические 335  
— сопротивления 323  
— термоэлектрические 336  
— фотоэлектрические 332  
— электролитические 328  
Приборы классификации 26  
— непосредственной оценки  
26, 31  
— самопишущие 280  
— с непрерывной записью 280  
— — точечной записью 283  
— сравнения 26  
— условные обозначения 28  
Противодействующий момент  
33  
Прямой метод измерения 7  
Пятистержневой трансформа-  
тор напряжения 206

## Р

Рабочие измерительные при-  
боры 6  
— меры 6  
Развертка по времени 287,  
288, 294  
Разделение потерь в стали 319  
Разметка зажимов измеритель-  
ных трансформаторов 243

Разномерный магазин сопро-  
тивления 22, 23  
Реактивная мощность 236  
Реактивный ваттметр 237  
Регистрирующие приборы 280  
Резистор добавочный 74  
Релаксационный генератор 296,  
297  
Реостатный преобразователь  
322  
Рычажный магазин сопротив-  
лений 24

## С

Самопишущие приборы 280  
Самоход счетчика 262  
Секунда 15  
Систематическая погреш-  
ность 9  
Случайная погрешность 10  
Слюдяной конденсатор 25  
Сопротивление заземления 209  
— критическое 85  
— переходное 182  
Сравнение частот при помощи  
электронного осциллографа  
298  
Сравнивающие устройства 159  
Стабилитрон 156  
Стали листовая испытание 307,  
313, 317  
Стрелочный гальванометр 79  
Сходимость моста 223  
Счетный механизм 260  
Счетчик активный 257  
— ампер-часов 270  
— двухэлементный 264, 265  
— импульсов 160  
— индукционный 257  
— магнитоэлектрический 270  
— однофазный 257  
— трехфазный 264  
— трехэлементный 264  
— электродинамический 269

## Т

Тангенс угла потерь 26, 229  
Термическая устойчивость 124  
Термодинамическая темпера-  
тура, Кельвин 15  
Термопреобразователи 96  
Термосопротивления 325  
Термоэлектрические приборы  
96

Токовые весы 18  
Точность измерительных приборов 41  
Трансформатор напряжения 110  
— — классы точности 116  
— — пятистержневой 206  
— тока 117  
— — динамическая устойчивость 124  
— — каскадный 126  
— — компенсированный 122  
— — термическая устойчивость 124  
Трансформаторы измерительные 110  
Трехэлементный ваттметр 245  
Тряскопрочные приборы 31  
Тряскоустойчивые приборы 31

### У

Угловая погрешность 112, 120, 121  
Ударопрочные приборы 31  
Удельный противодействующий момент 35  
— устанавливающий момент 36  
Указатель последовательности фаз 275  
Условные обозначения приборов 28, 29, 30  
Успокоение приборов 40, 41  
Успокоитель воздушный 41  
— магнитоиндукционный 41  
Устанавливающий момент 36

### Ф

Фазометр ферродинамический 271  
— цифровой 172, 173  
— ферродинамический 271  
— электромагнитный 273  
Фазоуказатель 275  
Фарадометр 221  
Ферродинамический механизм 62  
Феррометр 313  
Фигура Лиссажу 298  
Флюксметр 301  
Фотокомпенсационный усилитель 98  
Фотоэлектрический преобразователь 332

### Х

Холла эффект 307

Холостой ход счетчика 262

### Ц

Цифровые приборы 141

### Ч

Частотомер выпрямительный 278  
— ферродинамический 275  
— цифровой 172  
— ферродинамический 275  
— электромагнитный 277  
Чувствительность гальванометра 80, 81, 85  
— баллистического 87  
— счетчика 232  
— электроннолучевой трубки 294

### Ш

Шифраторы 164  
Шкалы приборов 39  
Штенсельный магазин сопротавлений 22  
Шунт 72  
— магнитный 48

### Э

Экран 51, 56  
Электрические единицы 15  
Электродинамическая система 58  
Электродинамические приборы 101  
— счетчики 269  
Электромагнитная система 53  
Электромагнитные приборы 99  
Электромеханический осциллограф 286  
Электроннолучевая трубка 292  
Электронный вольтметр 105  
— осциллограф 292  
Электростатические приборы 104  
Эталоны 18  
Эффект Холла 307

### Я

Ядерный магнитный резонанс 305

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Глава первая. Основы метрологии и электроизмерительные приборы . . . . .</b>	<b>6</b>
1-1. Основные понятия . . . . .	6
1-2. Единицы измерения . . . . .	15
1-3. Меры электрических единиц . . . . .	18
1-4. Общие сведения об электроизмерительных приборах . . . . .	26
<b>Глава вторая. Измерительные механизмы приборов непосредственной оценки . . . . .</b>	<b>47</b>
2-1. Магнитоэлектрическая система . . . . .	47
2-2. Электромагнитная система . . . . .	53
2-3. Электродинамическая система . . . . .	58
2-4. Ферродинамическая система . . . . .	62
2-5. Индукционная система . . . . .	64
2-6. Электростатическая система . . . . .	67
<b>Глава третья. Приборы непосредственной оценки для измерения тока и напряжения. . . . .</b>	<b>70</b>
3-1. Схемы включения амперметра и вольтметра . . . . .	70
3-2. Шунты . . . . .	72
3-3. Добавочные резисторы . . . . .	74
3-4. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы . . . . .	76
3-5. Гальванометры магнитоэлектрической системы . . . . .	79
3-6. Амперметры и вольтметры выпрямительной системы . . . . .	93
3-7. Амперметры и вольтметры термоэлектрической системы . . . . .	96
3-8. Амперметры и вольтметры электромагнитной системы . . . . .	99
3-9. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем . . . . .	101
3-10. Вольтметры электростатической системы . . . . .	104
3-11. Электронные вольтметры . . . . .	105
<b>Глава четвертая. Измерительные трансформаторы . . . . .</b>	<b>110</b>
4-1. Трансформаторы напряжения . . . . .	110
4-2. Трансформаторы тока . . . . .	117
<b>Глава пятая. Приборы сравнения для измерения напряжения и тока. Цифровые приборы . . . . .</b>	<b>128</b>
А. Приборы сравнения . . . . .	128
5-1. Компенсационный метод измерения напряжения и э. д. с. . . . .	128
	395

5-2. Потенциометры постоянного тока . . . . .	130
5-3. Работа с потенциометром постоянного тока и его применение . . . . .	133
5-4. Автоматические потенциометры . . . . .	135
5-5. Потенциометры переменного тока . . . . .	137
<b>Б. Цифровые приборы . . . . .</b>	<b>141</b>
5-6. Общие сведения о цифровых приборах . . . . .	141
5-7. Кодированные преобразователи . . . . .	146
5-8. Элементы цифровых приборов. . . . .	151
5-9. Цифровые вольтметры, частотомеры, фазометры . . . . .	169
<b>В. Измерение тока и напряжения . . . . .</b>	<b>174</b>
5-10. Измерение тока и напряжения в цепях постоянного и переменного тока промышленной частоты и в трехфазных цепях . . . . .	174
5-11. Измерение тока и напряжения при повышенной частоте. . . . .	177
<b>Глава шестая. Измерение сопротивлений. . . . .</b>	<b>181</b>
<b>А. Приборы и методы измерений непосредственной оценки. Косвенные методы измерений . . . . .</b>	<b>181</b>
6-1. Замечания, относящиеся к измерениям сопротивлений . . . . .	181
6-2. Особенности измерения малых и больших сопротивлений . . . . .	182
6-3. Омметры . . . . .	185
6-4. Измерение средних сопротивлений методом амперметра и вольтметра . . . . .	190
6-5. Измерение больших сопротивлений методом гальванометра и вольтметра . . . . .	191
6-6. Измерение средних и больших сопротивлений методом вольтметра . . . . .	192
<b>Б. Приборы и методы сравнения . . . . .</b>	<b>192</b>
6-7. Измерение малых и средних сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением . . . . .	192
6-8. Измерение средних и больших сопротивлений методом замещения . . . . .	193
6-9. Измерение средних и малых сопротивлений одинарным мостом . . . . .	194
6-10. Измерение малых сопротивлений двойным мостом . . . . .	199
<b>В. Измерение сопротивления изоляции установок и определение места повреждения изоляции . . . . .</b>	<b>202</b>
6-11. Замечания, относящиеся к измерению сопротивления изоляции установок . . . . .	202
6-12. Измерение сопротивления изоляции установки, не находящейся под рабочим напряжением . . . . .	203
6-13. Измерение сопротивления изоляции установки, находящейся под рабочим напряжением. . . . .	204
6-14. Определение места повреждения изоляции линии . . . . .	207
<b>Г. Измерение сопротивления заземления . . . . .</b>	<b>209</b>
6-15. Основные понятия и определения, относящиеся к заземлению . . . . .	209

6-16	Измерение сопротивления заземления методом амперметра и вольтметра . . . . .	211
6-17.	Измеритель сопротивления заземления типа М1103 . . . . .	212
6-18.	Измеритель сопротивления заземления типа МС-08 . . . . .	213
<b>Глава седьмая. Измерение индуктивности, взаимной индуктивности и емкости . . . . .</b>		
<b>А. Косвенные методы измерений и приборы непосредственной оценки . . . . .</b>		
7-1.	Замечания, относящиеся к измерению индуктивности, взаимной индуктивности и емкости . . . . .	215
7-2.	Измерение индуктивности на переменном токе. . . . .	216
7-3.	Измерение взаимной индуктивности на переменном токе . . . . .	217
7-4.	Измерение емкости на переменном токе . . . . .	218
7-5.	Измерение емкости баллистическим гальванометром . . . . .	219
7-6.	Приборы непосредственной оценки для измерения емкости (микрофарадометры) . . . . .	220
<b>Б. Методы и приборы сравнения . . . . .</b>		
7-7.	Условия равновесия моста переменного тока . . . . .	221
7-8.	Измерение индуктивности мостом . . . . .	223
7-9.	Измерение взаимной индуктивности мостом. . . . .	227
7-10.	Измерение емкости мостом . . . . .	228
<b>Глава восьмая. Измерение мощности. . . . .</b>		
8-1.	Измерение мощности в цепи постоянного тока. . . . .	230
8-2.	Электродинамический ваттметр в цепи переменного тока . . . . .	233
8-3.	Ферродинамический ваттметр . . . . .	237
8-4.	Измерение мощности ваттметром с измерительными трансформаторами . . . . .	239
8-5.	Измерение активной мощности в трехфазных цепях . . . . .	244
8-6.	Измерение реактивной мощности в трехфазных цепях . . . . .	251
8-7.	Измерение мощности в трехфазных цепях с применением измерительных трансформаторов . . . . .	255
<b>Глава девятая. Измерение электрической энергии и количества электричества . . . . .</b>		
9-1.	Общие понятия . . . . .	256
9-2.	Индукционный однофазный счетчик активной энергии . . . . .	257
9-3.	Измерение активной энергии в трехфазных цепях . . . . .	264
9-4.	Измерение реактивной энергии в трехфазных цепях . . . . .	265
9-5.	Электродинамический счетчик . . . . .	269
9-6.	Магнитоэлектрический счетчик . . . . .	270
<b>Глава десятая. Измерение коэффициента мощности и частоты переменного тока. . . . .</b>		
10-1.	Электродинамические и ферродинамические фазометры . . . . .	271
10-2.	Электромагнитный фазометр . . . . .	273
10-3.	Фазоуказатель . . . . .	274
10-4.	Электродинамические и ферродинамические частотомеры . . . . .	275
10-5.	Электромагнитный частотомер . . . . .	277

10-6. Выпрямительный частотомер . . . . .	278
10-7. Мост для измерения частоты . . . . .	279
<b>Глава одиннадцатая. Регистрирующие приборы</b>	<b>280</b>
<i>А. Самопишущие приборы . . . . .</i>	<i>280</i>
11-1. Назначение самопишущих приборов . . . . .	280
11-2. Приборы с непрерывной записью . . . . .	280
11-3. Приборы с точечной записью . . . . .	283
11-4. Приборы для записи нормальных и аварийных режимов работы . . . . .	284
11-5. Общие замечания . . . . .	285
<i>Б. Осциллографы . . . . .</i>	<i>286</i>
11-6. Назначение осциллографов . . . . .	286
✓ 11-7. Светолучевые или электромеханические осциллографы . . . . .	286
11-8. Электронные или электронно-лучевые осциллографы . . . . .	292
<b>Глава двенадцатая. Магнитные измерения . . . . .</b>	<b>299</b>
12-1. Общие замечания . . . . .	299
12-2. Измерение постоянного магнитного потока. . . . .	299
12-3. Измерение магнитной индукции, напряженности магнитного поля и магнитного напряжения . . . . .	302
12-4. Получение кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла баллистическим методом . . . . .	307
12-5. Феррометр . . . . .	313
12-6. Получение магнитных характеристик с применением электронного осциллографа . . . . .	316
12-7. Определение потерь в стали ваттметровым методом	317
12-8. Разделение потерь в стали . . . . .	319
<b>Глава тринадцатая. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. . . . .</b>	<b>320</b>
✓ 13-1. Общие замечания . . . . .	320
13-2. Параметрические преобразователи . . . . .	322
13-3. Генераторные преобразователи . . . . .	334
<b>Глава четырнадцатая. Лабораторные работы</b>	<b>337</b>
<i>А. Общие указания к выполнению работ . . . . .</i>	<i>337</i>
<i>Б. Допустимые условия работы элементов электрических цепей . . . . .</i>	<i>339</i>
<i>В. Указания, относящиеся к поверке амперметров, вольтметров, ваттметров . . . . .</i>	<i>343</i>
<i>Г. Содержание лабораторных работ . . . . .</i>	<i>345</i>
14-1. Поверка технического амперметра (работа 1) . . . . .	345
14-2. Поверка технического вольтметра (работа 2). . . . .	346
14-3. Определение параметров зеркального гальванометра (работа 3) . . . . .	347
14-4. Поверка образцовых приборов с применением потенциометра постоянного тока (работа 4). . . . .	350
14-5. Определение погрешностей измерительного трансформатора тока (работа 5) . . . . .	352

14-6. Измерение сопротивлений одинарным мостом (работа 6) . . . . .	356
14-7. Измерение сопротивлений двойным мостом (работа 7) . . . . .	357
14-8. Измерение сопротивления изоляции (работа 8) . . . . .	357
14-9. Измерение сопротивления заземления (работа 9) . . . . .	358
14-10. Измерение индуктивности мостом переменного тока (работа 10) . . . . .	359
14-11. Измерение емкости мостом переменного тока (работа 11) . . . . .	35
14-12. Проверка ваттметра и счетчика (работа 12) . . . . .	360
14-13. Измерение коэффициента мощности (работа 13) . . . . .	36
14-14а. Измерение мощности двухэлементным ваттметром (работа 14а) . . . . .	365
14-14б. Измерение мощности двухэлементным ваттметром с трансформаторами тока (работа 14б) . . . . .	367
14-15. Измерение мощности в трехфазной высоковольтной цепи (работа 15) . . . . .	369
14-16. Включение счетчиков активной и реактивной энергии в трехфазную цепь (работа 16) . . . . .	372
14-17. Изучение светолучевого или электромеханического осциллографа и его применение (работа 17) . . . . .	374
14-18. Изучение электронно-лучевого или электронного осциллографа и его применение (работа 18) . . . . .	380
14-19. Изучение работы электронного вольтметра (работа 19) . . . . .	385
14-20. Изучение и применение цифрового вольтметра (работа 20) . . . . .	386
Приложение. Государственные стандарты по электроизмерительным приборам . . . . .	387
Список литературы . . . . .	388
Алфавитный указатель . . . . .	390

**ВИКТОР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Редактор *Б. Р. Шульман*  
Редактор издательства *М. И. Николаева*  
Переплет художника *А. А. Иванова*  
Технический редактор *Л. В. Иванова*  
Корректор *Г. Г. Желтова*

---

Сдано в набор 11/VI 1973 г. Подписано к печати 11/XI 1973 г. Т 17640  
Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 3. Усл. печ. л. 21,0.  
Уч.-изд. л. 21,97. Тираж 100 000 экз. Зак. 871. Цена 84 коп.

---

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

---

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Ленинград, Гатчинская ул., 26,