

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электрические измерения рассматривают все электрические и магнитные величины, такие как электрический ток, напряжение, мощность, энергия, магнитный поток, и т.п. Определение этих величин актуально для надлежащего управления и контроля электрических устройств, цепей, и систем.

Электрические измерительные приборы широко используются также для измерения неэлектрических величин (как например температура, давление, и т.п.), которые сначала преобразуются в пропорциональные электрические величины.

Измерение – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (ГОСТ 16263-70).

Цель измерения – получение количественной информации.

Метрология – наука об измерении, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Основные разделы метрологии:

- 1) общая теория измерений;
- 2) методы и средства измерений;
- 3) методы определения точности измерений;
- 4) эталоны и образцовые средства измерений;

ВИДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Виды измерений:

– прямые измерения, когда находится сама искомая величина

$$X = X_{изм}$$

– косвенные измерения, когда прямым способом находят значение других величин, а искомая величина определяется расчетным путем по известной функциональной зависимости от измеренных величин $X = f(X_1 X_2 X_3 \dots)$

(определение сопротивления $R = U/I$)

Косвенное измерение используется в случае:

- 1) отсутствуют приборы прямого измерения;

FUNDAMENTALS OF METROLOGY

BASIC DEFINITIONS

Electrical measurements involve all electric and magnetic quantities, such as current, voltage, power, energy, magnetic flux, and so on. Knowledge of the magnitude of these quantities is essential for proper supervision and control of electric devices, circuits, and systems.

Electrical measuring instruments are widely used to measure nonelectric quantities as well (such as temperature, pressure, etc.), which are first converted into proportional electric quantities.

Measurement – is an experimental determination of physical quantity value by means of special technical facilities.

An object of measurement – is to receive quantitative information.

Metrology – is a science about the measurements, methods and facilities for measurement, which assure the ways of achievement of the required accuracy.

Basic metrology divisions:

- general theory of measurement;
- methods and facilities of measurement;
- methods of definition of the measurement accuracy;
- standards and reference instruments;

TYPES AND METHODS OF MEASUREMENTS'

Measurement types are:

– direct measurement, when a sought quantity is defined exactly,

$$X = X_{meas}$$

– inferential (indirect) measurement, when the intermediate quantities are defined in direct manner and a sought quantity is determined by means of calculations by known functional dependence on measured quantities $X = f(X_1 X_2 X_3 \dots)$.

(determination of resistance $R = U/I$)

Indirect measurement is used when:

- 1) there are no instruments for direct measurement;

- 2) невозможно использование приборов прямого измерения;
- 3) необходимо получения более высокой точности;

- совокупные измерения. В совокупных измерениях искомая величина определяется решением системы уравнений, составленной на основании прямых и косвенных измерений однородных величин.

$$f(X_1 X_2 X_3 \dots) = 0, \quad X_1, X_2, X_3 \dots - \text{однородные величины.}$$

- совместные измерения. В совместных измерениях искомая величина определяется решением системы уравнений, составленной на основании прямых и косвенных измерений разнородных величин.

$$f(X_1 X_2 X_3 \dots) = 0, \quad X_1, X_2, X_3 \dots - \text{разнородные величины.}$$

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- непосредственной оценки, в котором определяют всю искомую величину полностью по отсчетному устройству прибора? Этот метод представляет числовое значение измеряемой величины непосредственно на шкале прибора. Метод самый простой, но не точный. В этом случае предел точности измерения определяется используемым прибором и поэтому не может быть очень высоким.

- сравнения; В это случае измерение физической величины является процессом, при котором ее значение определяется экспериментально путем сравнения с другой известной величиной такого же типа. В общем случае, такое сравнение приводит к использованию стандарта (меры), который является физическим представлением измеряемой величины, и компаратора

Эта группа методов состоит: нулевой метод, дифференциальный метод; метод замещения; метод совпадения.

Дифференциальный метод

В дифференциальном методе измеряемая величина уравновешивается с мерой (известной величиной), но полное равновесие никогда не достигается. Вместо этого оператор считывает разницу между их величинами.

Этот метод используется для сравнения двух величин, которые мало отличаются друг от друга.

В дифференциальном методе измеряется не вся величина, а разность между ней и мерой.

- 2) it is impossible to apply instruments for direct measurement;
- 3) it is necessary to receive higher accuracy.

- combined measurement. At combined measurement a sought quantity is determined by means of solution of simultaneous equations on the basis of direct and indirect measurements of the homogeneous quantities. $f(X_1 X_2 X_3 \dots) = 0$, $X_1, X_2, X_3 \dots$ - homogeneous quantities.

- joint measurement. At joint measurement sought quantity is determined by means of solution equations on the basis of direct and indirect measurements of the heterogeneous quantities.

$$f(X_1 X_2 X_3 \dots) = 0, \quad X_1, X_2, X_3 \dots - \text{heterogeneous quantities.}$$

MEASUREMENT METHODS

- direct estimation method. In this case a sought quantity is determined by the measuring indicator of instrument, this method presents the numerical value of the measurand (the quantity being measured) directly on a scale. This method is the simplest but inaccurate. In this case, the limit of accuracy is that of the instrument used, which can not be very high

- comparison method. In this case the measurement of a physical quantity is a procedure by which the value of that quantity is determined through an experiment by comparing it with another known quantity of the same kind chosen as a unit. In the general case, such a comparison calls for the use of a standard which is a physical embodiment of the unit, and a *comparator*

This group of methods consists of a balanced method, differential method, substitution method, coincidence method.

Differential method

In differential measurement method the measurand is balanced with a measure (known quantity), but a complete balance is never sought. Instead the operator reads the difference between the two.

This method is used to compare any two quantities which differ but little from each other.

In differential method only the difference between the sought quantity and measure is defined.

С помощью вольтметра измеряется разница ΔV_x между измеряемой величиной E_x и известной величиной E_o

$$\begin{aligned} \text{Поскольку} \quad & \Delta V_x = E_x - E_o \\ \text{Тогда} \quad & E_x = E_o + \Delta V_x \end{aligned}$$

Нулевой метод

В этом методе разность между измеряемой величиной и известной величиной, или эффектами их действия сводится к нулю. Для этого используется регулируемый источник (мера) и гальванометр.

$$E_o = \text{var} \quad \Delta U_x = 0, \quad E_x = E_o$$

Здесь измерительный прибор необходим лишь для получения равенства измеряемой величины и меры. Это должен быть очень точный прибор, его обычно называют нуль-индикатор. При измерениях в цепях постоянного тока в качестве нуль-индикаторов наиболее часто используют гальванометры магнитоэлектрической системы.

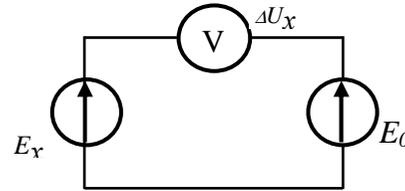
Точность нулевого метода очень высокая и в основном определяется точностью меры (стандарта) и чувствительностью гальванометра. Это теоретически самый точный метод.

Метод замещения

В этом методе поочередно определяются отклонения указателя прибора при подключении сначала к известной величине, а затем к измеряемой величине.

$$E_o = k U_{X1}, \quad k = E_o / U_{X1}, \quad E_x = k U_{X2}$$

Искомая величина рассчитывается по отношению отклонений. Метод используется при измерении малых величин и при калибровке измерительных приборов или их цепей.



By a voltmeter the difference ΔV_x is measured between measured quantity E_x and known quantity E_o .

$$\begin{aligned} \text{As} \quad & V_x = E_x - E_o \\ \text{Then} \quad & E_x = E_o + \Delta V_x \end{aligned}$$

Balanced method

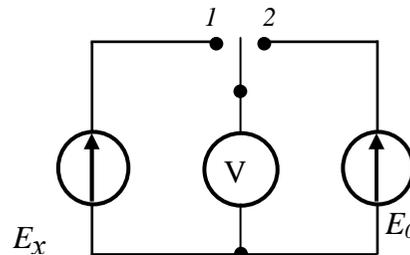
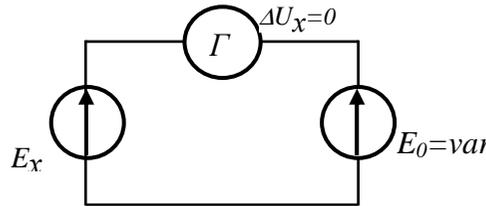
Here the difference between the quantity under study and known one or between effects of their action is reduced to zero. The adjustable voltage source (measure) and galvanometer is utilized for this purpose.

$$E_o = \text{var} \quad \Delta U_x = 0, \quad E_x = E_o$$

Here a measuring device is needed only for the receipt of equality of the measured quantity and measure. This must be a very exact device, it is usually called null indicator. The moving-coil galvanometers the most commonly are used in d.c. measurements as null indicator.

The accuracy of the balanced method is very high and mainly depends on the accuracy of the reference standards used and the sensitivity of the null indicator.

In the theory it is the most exact method.



Substitution method

At this method the quantity under study is substituted by measure. The scale readings are taken first while connecting the instrument to a known quantity and then to the quantity under study.

$$E_o = k U_{X1}, \quad k = E_o / U_{X1}, \quad E_x = k U_{X2}$$

A sought quantity is calculated by the ratio of deviations.

This method is used for calibration of the measuring instruments or their circuits.

Метод совпадения

Значение измеряемой величины определяется по совпадению отметок шкал, электрических сигналов ($E_0 = var$).

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Погрешностью называется отклонение результатов измерений от истинного значения величины. Существуют 3 числовые оценки погрешности:

АБСОЛЮТНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ - разность между

измеренным и действительным значением величины :

$$\Delta = X_{рез} - X \quad [ед.изм.]$$

где : $X_{изм}$ – результат измерения

X – действительное значение, за него принимают

действительное значение или значение, которое может быть найдено с помощью более точных средств и методов.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ – это отношение

абсолютной погрешности к действительному значению :

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{X_{изм}} \times 100\%$$

Относительная погрешность также известна как погрешность относительно измеренной величины.

ПРИВЕДЕННАЯ ПОГРЕШНОСТЬ – понятие метрологии

(отнесенная к некоторому значению)

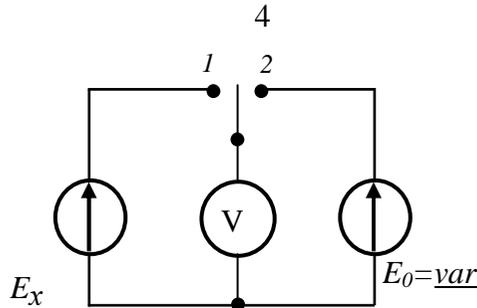
$$\gamma = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100\%$$

Приведенная погрешность также известна как погрешность относительно полного отклонения шкалы.

X_n - нормирующее значение

а) $X_n = X_{предел}$ - почти всегда

б) $X_n = |X_{пред.лев}| + |X_{пред.прав}|$ для двусторонней шкалы



Coincidence method

The value of measured quantity is defined by coincidence of the scale marks, electrical signals ($E_0 = var$).

MEASUREMENT ERRORS

Measurement error is a deviation of measurement results from the true value of quantity. There are 3 numerical estimations of measurement errors:

ABSOLUTE ERROR – is the difference between the measured value and the true value (known quantity) of the measurand.

$$\Delta = X_{meas} - X$$

where : X_{meas} – result of measurement

X – true value. This is the true value or the value, which may be defined by means of facilities with higher accuracy.

RATIO ERROR – is a ratio of an absolute error to a true value:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{X_{meas}} \times 100\%$$

Ratio error is known as the percent-of-indication (ind) error.

REDUCED ERROR – is a metrology conception (quotient of absolute error to some value)

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100\%$$

Reduced error is known as the percent-of-full-scale deflection (fsd) error.

X_n - fiducial value

a) $X_n = X_{limit}$ – almost always

b) $X_n = |X_{lim.left}| + |X_{lim.right}|$ for center-zero scale

- в) $X_H = l_{полн.}$, когда шкала неравномерная
 г) $X_H = X_{ном}$, прибор рассчитанный на определенное значение (рассчитан на контроль определенного значения).

ФОРМУЛЫ СВЯЗИ

$$\Delta = \frac{\delta \cdot x}{100\%}; \quad \Delta = \frac{\gamma \cdot x_H}{100\%}$$

$$\delta = \frac{\gamma \cdot x_H}{x}; \quad \gamma = \frac{\delta \cdot x}{x_H}$$

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

1) Систематическая и случайная погрешности.

Систематическая погрешность вызвана закономерно действующими причинами и проявляется в виде смещения результата измерения от действительного значения. Систематическая погрешность может быть вычислена и введена в виде поправки результата.

Случайная погрешность вызывается причинами, в действии которых нет закономерности, и выражается в разбросе показаний (дисперсии относительно действительного значения при повторных измерениях). Она может быть оценена вероятностными методами.

$\Delta X = \Delta X_c + \Delta X^o$ - вся погрешность

ΔX_c - систематическая и ΔX^o случайная погрешность.

2) Методическая и инструментальная погрешности.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством методических измерений, неточностью расчетных формул, схемой включения приборов.

- с) $X_n = l_{total}$ for non-uniform scale
 д) $X_n = X_{nom}$ in case of an instrument intended for control of fixed value .

CALCULATION FORMULAS

$$\Delta = \frac{\delta \cdot x}{100\%}; \quad \Delta = \frac{\gamma \cdot x_n}{100\%}$$

$$\delta = \frac{\gamma \cdot x_n}{x}; \quad \gamma = \frac{\delta \cdot x}{x_n}$$

CLASSIFICATION OF ERRORS

1) Systematic and random errors.

Systematic error is caused by naturally acting reasons and it is displayed in the form of deviation of measurement result from a true value. A systematic error may be calculated and taken into account in the form of correction factor.

A random error is caused by reasons acting without any rule and it is expressed in reading spread (dispersion relatively true value at repeated measurement). It may be estimated by probabilistic methods.

$\Delta X = \Delta X_c + \Delta X^o$ - total error

ΔX_c - systematic and ΔX^o - random error

2) Truncation and instrumental errors.

Truncation error is caused by the imperfection of measurement method, by inaccuracy of calculation formulas and scheme of the instrument connection.

Когда прибор подключен к цепи, в которой измеряется какая-либо электрическая величина, то это неизбежно вызывает изменения тока в цепи и напряжения на участке цепи. Причиной этого является то, что прибор потребляет часть энергии из цепи.

В случае маломощных цепей это может сильно исказить результат. Для того чтобы избежать такого результата измерения должны предусматривать минимальное потребление энергии прибором.

Примером того, как прибор может влиять на результат измерения является определение сопротивления резистора (при постоянном токе) по закону Ома по току в цепи и напряжению на резисторе, измеренных амперметром и вольтметром соответственно.

Любая из двух схем (рис. *a* и *b*) может использоваться для этих целей, и в каждом случае потребление энергии приборами должно быть предусмотрено в расчете сопротивления.

В схеме на рис. *a* амперметр измеряет ток I_x резистора с сопротивлением R_x и вольтметр измеряет напряжение $U_v = U_x + I_x R_a$. Здесь R_a – сопротивление амперметра, таким образом, измеренное напряжение является суммой напряжения на резисторе U_x и напряжения на зажимах амперметра. Отсюда по закону Ома сумма сопротивлений резистора и амперметра:

$$U_v / I_x = R_x^I = R_x + R_a$$

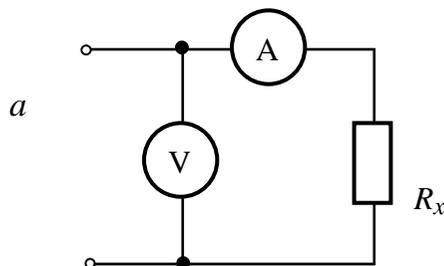
Действительное сопротивление резистора определяется по формуле:

$$R_x = R_x^I - R_a = R_x^I (1 - R_x^I / R_a)$$

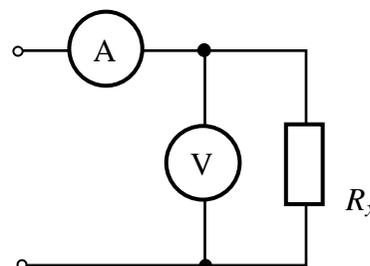
Тогда методическая погрешность: $\Delta_{mem} = R_x^I - R_x = R_a$

Очевидно, что погрешность измерения может быть снижена путем уменьшения сопротивления амперметра.

В схеме на рис. *b* вольтметр подключен непосредственно параллельно зажимам резистора и измеряет напряжение U_x на резисторе. Амперметр измеряет сумму тока резистора и тока в ветви с вольтметром $I_A = I_x + I_v$



a



b

When an instrument is connected in the circuit where some electrical quantity is to be measured, this inevitably brings about a change in the current(s) in and the voltage(s) across the circuit. The reason is that the instrument draws some power from the circuit.

In the case of low-power circuits, it may strongly distort the results. To avoid this, measures must be taken to keep the instrument's power to a minimum.

An example how an instrument may affect the result of a measurement is the determination of the resistance of a resistor (to direct current) by Ohm's law after the current in and the voltage across the resistor have been measured with an ammeter and a voltmeter respectively.

Any one of two set-ups may be used for the purpose (Fig. *a* and *b*), and in each case the power drawn by the instruments must be allowed for in calculating the resistance.

In the set-up of Fig. *a* the ammeter measures the current I_x in the resistor of resistance R_x , and the voltmeter measures the voltage

$$U_v = U_x + I_x R_a.$$

Here R_a is the resistance of the ammeter, so the measured voltage is the sum of the voltage across the resistor, U_x , and the voltage between the ammeter's terminals. Hence, by Ohm's law, the sum of the resistances of the resistor and of the ammeter is:

$$U_v / I_x = R_x^I = R_x + R_a$$

The actual resistance of the resistor is determined by formula:

$$R_x = R_x^I - R_a = R_x^I (1 - R_x^I / R_a)$$

In that case truncation error is:

$$\Delta_{tranc} = R_x^I - R_x = R_a$$

Obviously, the error of measurement can be brought down by reducing the resistance of the ammeter.

In the set-up of Fig. *b* the voltmeter is connected directly across the terminals of the resistor and reads the voltage U_x across the resistor. The ammeter measures the sum of the currents in the resistor and in the voltmeter circuit $I_A = I_x + I_v$.

Тогда общая проводимость равна:

$$g_x^I = I_A / U_x = g_x + g_v = 1/R_x + 1/R_v ,$$

где R_v – сопротивление вольтметра.

Проводимость резистора может быть найдена вычитанием проводимости вольтметра из общей проводимости, определенной ранее :

$$g_x = g_x^I - g_v = g_x^I (1 - g_v / g_x^I), \quad R_x = R_x^I / (1 - R_x^I / R_v)$$

Как видно мы можем улучшить точность измерения путем увеличения сопротивления вольтметра.

Инструментальная погрешность, - погрешность средства измерения, ее допустимое значение указывается в паспорте прибора (ее можно нормировать, указать max значение).

3) Аддитивная и мультипликативная погрешность.

Аддитивная – постоянная составляющая погрешности.

$$\Delta_{ad} = \pm a = const$$

$$\delta_{ad} = \frac{\Delta_{ad}}{X} = \pm \frac{a}{X} = var.$$

Мультипликативная - переменная составляющая погрешности (зависит от величины измерения), прямо пропорциональная зависимость.

$$\Delta_M = \pm bX = var$$

$$\delta_M = \frac{\Delta_M}{X} = \pm b = const$$

4) Основная и дополнительная погрешности

- Основная – при нормальных условиях эксплуатации прибора.
- Дополнительная – при отклонении от этих условий.

Hence, the total conductance is :

$$g_x^I = I_A / U_x = g_x + g_v = 1/R_x + 1/R_v ,$$

where R_v is the resistance of the voltmeter.

The conductance of the unknown resistor can be found by subtracting the conductance of the voltmeter from the total conductance determined earlier

$$g_x = g_x^I - g_v = g_x^I (1 - g_v / g_x^I), \quad R_x = R_x^I / (1 - R_x^I / R_v)$$

As is seen, we can improve the accuracy of measurement by increasing the resistance of the voltmeter.

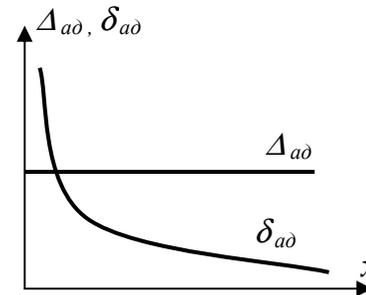
Instrumental error is the inaccuracy of a measuring device, its accepted value is shown in a registration certificate of an instrument.

3) Additive and multiplicative errors.

Additive one – is a constant component of an inaccuracy.

$$\Delta_{ad} = \pm a = const$$

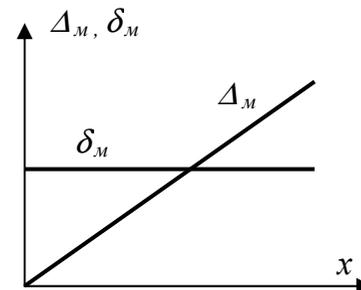
$$\delta_{ad} = \frac{\Delta_{ad}}{X} = \pm \frac{a}{X} = var.$$



Multiplicative one – is a variable component of an inaccuracy (depends on the value of measurement), directly proportional dependence.

$$\Delta_M = \pm bX = var$$

$$\delta_M = \frac{\Delta_M}{X} = \pm b = const$$



4) Basic and additional errors

- Basic one arises at standard conditions of the instrument operation.
- Additional one occurs when the conditions are abnormal.

5) Статическая и динамическая погрешности.

Статическая – есть погрешность измерения, которая за время измерения, практически не изменяет своего значения.

Динамическая – которая за время измерения существенно изменяет свое значение

КЛАССЫ ТОЧНОСТИ

Класс точности – нормированная метрологическая характеристика, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность.

1) приборы с преобладающей аддитивной погрешностью

$$\Delta \approx \Delta_{ad} = \pm a = const ,$$

$$\delta = \pm \frac{a}{X} = var$$

$$\gamma = \pm \frac{a}{X_n} \cdot 100\% = const ,$$

$K = |\gamma_{max}|$, пример обозначения класса точности - 1,0 (не более 1% приведенной погрешности).

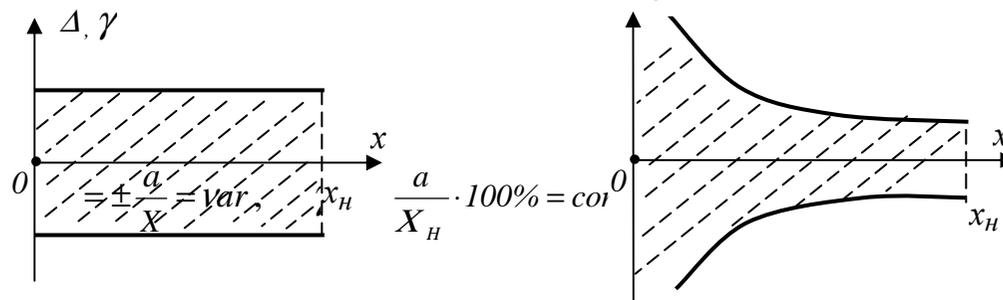
К этой группе относятся приборы с резко неравномерной шкалой.

$$K = |\gamma_{max}| \quad X_n = \ell_{пол} [мм] .$$

Расчетные формулы – через класс точности,

$$\Delta = \frac{KX_n}{100\%} , \quad \delta = \frac{KX_n}{X} , \quad X_n = \ell_{пол} [мм]$$

пример обозначения - 1,0 - (неравномерная шкала).



5) Static and dynamic errors

Static one is an error, which does not change its value during the measurement.

Dynamic error is the error that essentially changes its value during the measurement.

ACCURACY RATINGS

Accuracy rating is the standardized metrological feature, defined by the limits of allowable basic and additional errors as well as by other properties of the measuring device, which influence the accuracy.

1) instruments with predominant additive error

$$\Delta \approx \Delta_{ad} = \pm a = const ,$$

$$\delta = \pm \frac{a}{X} = var ,$$

$$\gamma = \pm \frac{a}{X_n} \cdot 100\% = const .$$

$K = |\gamma_{max}|$, an example of notation of an accuracy rating - 1,0 (not more than 1% of reduced error).

This group of devices consist instruments with non uniform scale

$$K = |\gamma_{max}| \quad X_n = \ell_{tot} [mm] .$$

Calculation formulas

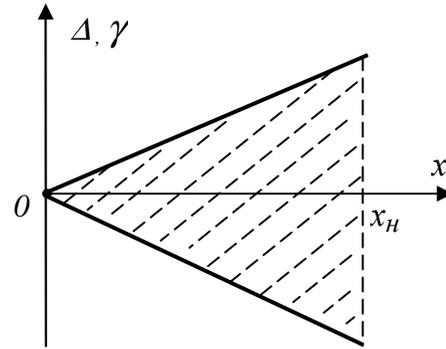
$$\Delta = \frac{KX_n}{100\%} , \quad \delta = \frac{KX_n}{X} , \quad X_n = \ell_{tot} [mm]$$

an example of notation is 1,0 - (nonuniform scale).

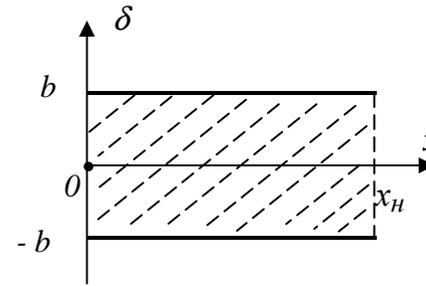
2) Приборы, в которых преобладают мультипликативные погрешности.

$$\Delta \approx \Delta_M = \pm bX = var, \\ \delta \approx \pm b = const, \quad \gamma = var$$

$K = |\delta_{max}|$, пример обозначения класса точности – $\textcircled{1,5}$ не более 1,5 % относительной погрешности).



9



2) Instruments with predominant multiplicative errors.

$$\Delta \approx \Delta_M = \pm bX = var, \\ \delta \approx \pm b = const, \quad \gamma = var$$

$K = |\delta_{max}|$, an example of accuracy rating notation is $\textcircled{1,5}$ (not more than 1,5 % of ratio error)

Расчетные формулы: $\Delta = \frac{K X}{100\%}$, $\gamma = \frac{K X}{X_H}$

К этой группе относятся индукционные счетчики и некоторые измерительные мосты. Остальные приборы относятся к первой группе.

Calculation formulas: $\Delta = \frac{K X}{100\%}$, $\gamma = \frac{K X}{X_H}$

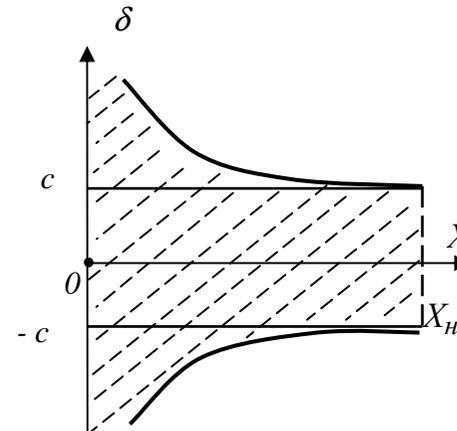
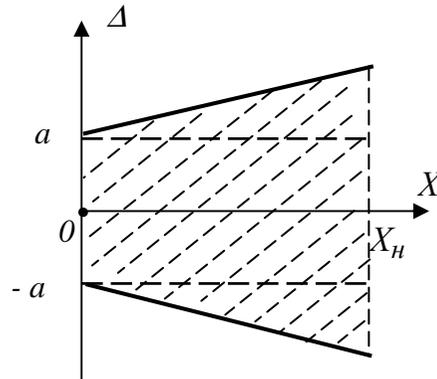
This group consist of induction type meters and some measurement bridges. Other instruments refer to the first group.

3) Приборы с соизмеримыми аддитивной и мультипликативной погрешностями.

$$\Delta = \Delta_{ad} + \Delta_M = \pm(a + bX)$$

$$\delta = \pm \frac{a + bX}{X} = \frac{a}{X} + b,$$

$$b = \delta_M$$



3) Instruments with comparable additive and multiplicative errors.

$$\Delta = \Delta_{ad} + \Delta_M = \pm(a + bX)$$

$$\delta = \pm \frac{a + bX}{X} = \frac{a}{X} + b,$$

$$b = \delta_M$$

$$\delta = \frac{a}{X} \cdot \frac{X_H}{X_H} + \delta_M = \gamma_{ад} \frac{X_H}{X} + \delta_M = \delta_M + \gamma_{ад} - \gamma_{ад} + \gamma_{ад} \frac{X_H}{X} = \underbrace{(\delta_M + \gamma_{ад})}_c + \underbrace{\gamma_{ад}}_d \left(\frac{X_H}{X} - 1 \right)$$

$$\delta = c + d \left(\frac{X_H}{X} - 1 \right)$$

Расчетное выражение $K = c/d$ (например, $1,0/0,5$)

d – аддитивная составляющая погрешности $d = \text{const} = \mathcal{Y}_{ad}$, приведенная погрешность для начала диапазона.

$$\delta = c + d \left(\frac{X_n - 1}{X} \right)$$

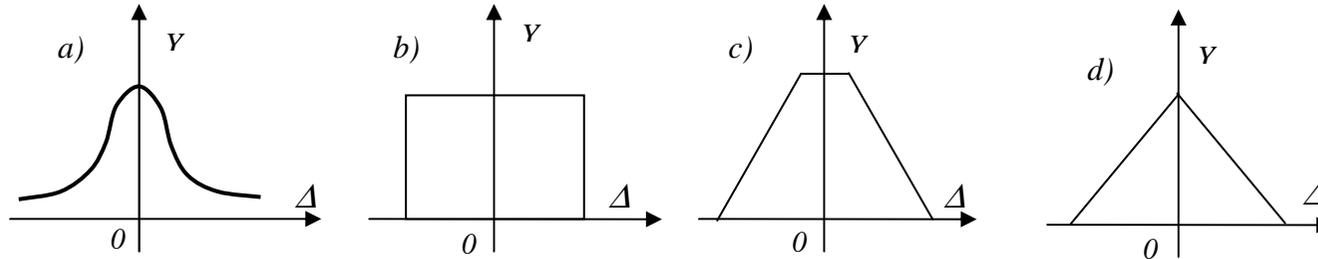
The accuracy rating $K = c/d$ (for example, $1,0/0,5$)

d – additive component of an error $d = \text{const} = \mathcal{Y}_{ad}$, reduced error for the beginning of the range.

ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Математическое описание случайных погрешностей выполняется с помощью теории вероятностей. Случайная величина наиболее полно характеризуется законом распределения погрешностей, среди которых наиболее часто применяются: нормальный, равномерный, трапецевидный, треугольный.

Наиболее распространенным является нормальный закон распределения погрешностей, который предполагает, что при большом числе измерений частота появления погрешностей, равных по абсолютной величине, но различного знака, одинакова и малые погрешности встречаются чаще.



Нормальный закон описывается формулой:

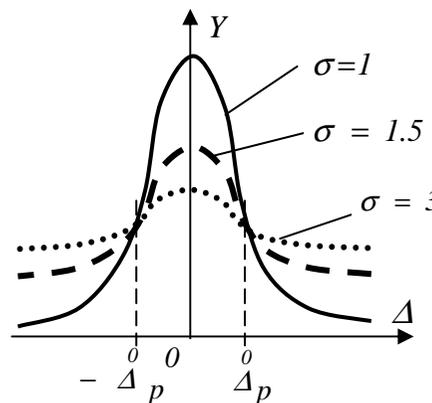
где:

Y – плотность вероятности случайной погрешности Δ ,
 σ – среднеквадратическое отклонение случайной погрешности.

Чем меньше σ , тем реже встречаются большие погрешности, т.е. вероятней получить малую погрешность.

Вероятность того, что погрешность находится между предельными значениями $(-\Delta_p^0, \Delta_p^0)$, вычисляется по формуле:

$$Y(\Delta^0) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta^0{}^2}{2\sigma^2}\right)$$



ESTIMATE OF RANDOM ERRORS

Mathematical formulation of random errors is realized by means of probability theory. A random quantity is characterized by the distribution law (often are used: normal law, uniform law, trapezoid law, delta-shaped law).

The normal distribution law of errors is the most commonly used, it means that at large quantity of measurements the frequency of occurrence of errors equal in magnitude but different in sign, is the same and small errors occur more often.

The normal distribution law is described by the formula: where:

Y – probability density of a random error Δ ,
 σ – root-mean-square deviation of a random error.

The less σ , the more seldom large errors occur, i.e. it is more likely to have a small error.

The probability that the error is somewhere between limit values $(-\Delta_p^0, \Delta_p^0)$ is calculated from the formula:

$$P(-\overset{\circ}{\Delta}_p \leq \overset{\circ}{\Delta} \leq \overset{\circ}{\Delta}_p) = \int_{-\overset{\circ}{\Delta}_p}^{\overset{\circ}{\Delta}_p} Y(\overset{\circ}{\Delta}) d\overset{\circ}{\Delta} = \int_{-\overset{\circ}{\Delta}_p}^{\overset{\circ}{\Delta}_p} \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\overset{\circ}{\Delta}^2}{2\sigma^2}\right) d\overset{\circ}{\Delta} \right)$$

In the table given below, the probability values for some intervals $[-\overset{\circ}{\Delta}_p, \overset{\circ}{\Delta}_p]$ are presented in units σ .

В таблице приведенной ниже представлены значения вероятностей для некоторых интервалов $[-\overset{\circ}{\Delta}_p, \overset{\circ}{\Delta}_p]$ в единицах σ .

$[-\overset{\circ}{\Delta}_p, \overset{\circ}{\Delta}_p]$	$2/3\sigma, +2/3\sigma$	$-\sigma, +\sigma$	$2\sigma, +2\sigma$	$-2,33\sigma, +2,33\sigma$	$-2,58\sigma, +2,58\sigma$	$-3\sigma, +3\sigma$	$-4\sigma, +4\sigma$
$P_D(-\overset{\circ}{\Delta}_p \leq \overset{\circ}{\Delta} \leq \overset{\circ}{\Delta}_p)$	0,5	0,68	0,95	0,98	0,99	0,997	0,99993

где: $[-\overset{\circ}{\Delta}_p, \overset{\circ}{\Delta}_p]$ - доверительный интервал, за который

погрешность не выйдет с некоторой (доверительной) вероятностью P_D

На практике используют значения $P_D: 0,95; 0,98; 0,99$.

При нормальном законе распределения для доверительного интервала $[-2\sigma, +2\sigma]$ с $P_D = 0,95$ из 20 случайных измерений только одно из них будет больше (по абсолютной величине) 2σ , а для доверительного интервала $[-3\sigma, +3\sigma]$ с $P_D = 0,997$ - из 370 только одно будет больше 3σ .

Случайная абсолютная погрешность i -го измерения определяется формулой $\overset{\circ}{\Delta}_i = X_i - X_H$, где: X_i - результат i -го измерения, X_H - истинное значение измеряемой величины.

Поскольку X_H неизвестно, вместо него используют среднееарифметическое значение ряда измерений:

где: n - число измерений.

Определим среднеквадратическое отклонение данного ряда измерений.

$$\bar{X} = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}$$

where: $[-\overset{\circ}{\Delta}_p, \overset{\circ}{\Delta}_p]$ - the confidence interval where the error occurs with some (confidence) probability P_C .

In practice the values of probability $P_C: 0,95; 0,98; 0,99$ are used.

Using the normal distribution law in the confidence interval $[-2\sigma, +2\sigma]$ with $P_C = 0,95$ only one out of 20 random values will be greater (in absolute value) than 2σ , and in the confidence interval $[-3\sigma, +3\sigma]$ with $P_C = 0,997$ - only one out of 370 random values will be greater than 3σ .

The random absolute error of i -th measurement is determined by the formula $\overset{\circ}{\Delta}_i = X_i - X_H$, where: X_i - result of i -th measurement, X_H - true value of quantity measured.

As X_H is unknown, the average value of a measuring run is used instead of it: where: n - number of tests (measurements).

Let's determine root-mean-square deviation of a given measuring run.

Ввиду того, что среднее арифметическое значение \bar{X} также является случайной величиной, введем понятие среднеквадратической погрешности результата измерений, которая характеризует степень разброса \bar{X} :

$$\sigma = \sigma / \sqrt{n} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n(n-1)}$$

При большом числе измерений применение нормального закона распределения вполне оправдано. Однако при небольшом числе измерений ($n < 20$) следует использовать распределение Стьюдента, которое отличается от нормального лишь при малых n .

В этом случае размер доверительного интервала увеличивается по сравнению с нормальным законом распределения:

$$\Delta_p^0 = t_p(n) \bar{\sigma}$$

где: $t_p(n)$ - квантили распределения Стьюдента, которые задаются в виде таблицы для различных значений доверительной вероятности P_D и разных n .

Результат измерения представляется в виде:

$$\bar{X}, \pm \Delta_p^0, P_D$$

Это означает, что с вероятностью P_D результат

измерения находится в интервале от $\bar{X} - \Delta_p^0$ до $\bar{X} + \Delta_p^0$

As the average value of \bar{X} is also a random quantity, we introduce the conception of root-mean-square error of a measuring result, which characterizes the spread of

At large number of tests the application of the normal distribution law is quite justified. However at small number of tests ($n < 20$) it is necessary to use Student's distribution differing from normal one only at small n .

In this case the confidence interval size increases in comparison with the normal law of distribution

$$\Delta_p^0 = t_p(n) \bar{\sigma}$$

where: $t_p(n)$ - quantiles of Student's distribution, which are given in the form of table for different values of the confidence probability P_C and different n .

The measurement result is presented in the form of:

$$\bar{X}, \pm \Delta_p^0, P_C$$

It means, that the measurement result is located in the interval from

$\bar{X} - \Delta_p^0$ to $\bar{X} + \Delta_p^0$ with

probability P_C .

Number of tests n	Confidence probability P_D				
	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99
2	3,08	6,31	12,7	31,8	63,7
3	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92
...
10	1,38	1,84	2,26	2,82	3,25
...
17	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
...
20	1,33	1,73	2,09	2,54	2,87
30	1,31	1,70	2,04	2,47	2,76

Пример №1

Произведено 17 измерений величины напряжения. Произвести обработку результатов измерений (предполагая их нормальное распределение). Систематической погрешностью пренебречь, выбрать доверительную вероятность равной 0,95.

Example №1

17 measurements of the voltage value have been made. It is necessary to carry out an analysis of observations (assuming their normal distribution). The systematic uncertainty is negligible. Assume the confidence probability is equal to 0,95.

Таблица результатов измерений

Table of the test results

i - номер измерения, X_i – результат измерения.

1). Определяем среднее арифметическое:

$$\bar{X} = (1681 + 1701 + 1693 + \dots + 1692) / 17 = 1688,0 \text{ мВ}$$

2). Определяем СКО

$$\bar{\sigma} = \sigma / \sqrt{n} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n(n-1)}$$

3). Для $P_D = 0,95$ и $n = 17$ определяем значение квантиля $t_p(n) = 2,12$.

4). Определяем доверительный интервал

$$\Delta_p^0 = t_p(n) \bar{\sigma} = 2 \cdot 2,12 = 4,2 \text{ мВ}$$

5). Результат измерения $U = 1688,0 \text{ мВ}$, $\Delta = \pm 4,2 \text{ мВ}$, $P_D = 0,95$.

Если в рассмотренной задаче не изменяя условий уменьшить число измерений до $n = 10$ (т.е. рассмотреть первые 10 измерений) то получим результат:

$$U = 1689,0 \text{ мВ}, \quad \Delta = \pm 7,0 \text{ мВ}, \quad P_D = 0,95$$

Сравнение результатов показывает, что при уменьшении числа измерений, происходит увеличение доверительного интервала, соответствующего одной и той же доверительной вероятности.

i	X_i	i	X_i	i	X_i
1	1681	7	1705	13	1682
2	1701	8	1685	14	1690
3	1693	9	1697	15	1687
4	1678	10	1690	16	1680
5	1686	11	1690	17	1687
6	1674	12	1685		

i - number of a test, X_i – result of a test.

1). Define the average value:

$$\bar{X} = (1681 + 1701 + 1693 + \dots + 1692) / 17 = 1688,0 \text{ мВ}$$

2). Define root-mean-square deviation

$$\bar{\sigma} = \sqrt{[(-7)^2 + (13)^2 + (5)^2 + \dots + (4)^2] / 17 \cdot 16} = 2 \text{ мВ}$$

3). For $P_D = 0,95$ and $n = 17$ we define the quantile value $t_p(n) = 2,12$.

4). Define the confidence interval

$$\Delta_p^0 = t_p(n) \bar{\sigma} = 2 \cdot 2,12 = 4,2 \text{ мВ}$$

5). The result of test is $U = 1688,0 \text{ мВ}$, $\Delta = \pm 4,2 \text{ мВ}$, $P_D = 0,95$.

If in the problem considered the number of tests is reduce to $n = 10$ (i.e. to examine 10 initial tests) then we obtain the following result:

$$U = 1689,0 \text{ мВ}, \quad \Delta = \pm 7,0 \text{ мВ}, \quad P_D = 0,95$$

The comparison of results demonstrates that reduction of number of tests, leads to the expansion of the confidence interval corresponding to the same confidence probability.

ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Показатели точности результатов измерения.

Результат измерения – числовые значения, которые приписывают измеряемой величине с указанием точности.

Показателями точности могут служить:

- Δ_p - доверительный интервал погрешности,
- P_d - доверительная вероятность,
- $\sigma(\Delta X)$ - оценка СКО (среднеквадратическое отклонение) погрешности.

Правила выражения показателей точности:

- а) численные показатели точности выражаются в единицах измеряемой величины;
- б) численные показатели точности должны содержать не более двух значащих цифр;
- в) наименьшие разряды результата измерения и численных показателей точности должны быть одного порядка.

Обработка результатов исследования

Пусть величина Y находится как $f(X_1, X_2, \dots, X_m)$, измерения многократны, результат наблюдения X_{ij} ,

$i=1...m$ – количество прямых измеряемых входных величин,

$j=1...n$ – число наблюдений каждой входной величины.

- 1) Исключение известных систематических погрешностей путем введения поправок $\Delta_{c_{ij}}$ для получения исправленных результатов наблюдений;

$$X_{ij}^l = X_{ij} - \Delta_{c_{ij}}$$

- 2) Исключение аномальных результатов измерения.

Наиболее часто для этого используют критерий Райта, согласно которому все результаты измерения с отклонениями от среднего арифметического более 3σ ошибочны и подлежат исключению.

ANALYSIS OF OBSERVATIONS AND THEIR REPRESENTATION

Accuracy figures of the test results.

A test result is numerical values, which are attributed to a measured quantity with the accuracy indication

The following quantities serve as accuracy figures (precision factors):

- Δ_p - the confidence interval of an error,
- P_c - confidence probability,
- $\sigma(\Delta X)$ - root-mean-square deviation.

Rules of the accuracy figures presentation:

- a) numerical accuracy figures are expressed in units of quantity measured;
- b) numerical accuracy figures must contain not more than two significant figures;
- c) the least number positions of the test result and numerical accuracy figures must be the same.

Analysis of observations

Let quantity Y be found as $f(X_1, X_2, \dots, X_m)$, tests are multiple, the observation result is X_{ij} ,

$i=1...m$ – number of direct input quantities measured,

$j=1...n$ – number of observations of each input quantity.

- 1) Elimination of known systematic errors by introducing corrections $\Delta_{c_{ij}}$ to receive the corrected results of observations

- 2) Elimination of abnormal measurement results.

Right criterion is commonly used for this; according to this criterion all measurement results with deviations from the average value by more than 3σ are fault and must be eliminated.

3) Вычисления среднего арифметического каждой входной величины

4) Результат измерения

$$Y = Y_N - \Delta_{метод.},$$

где $Y_N = f(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m)$.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}^l}{n}$$

3) Calculations of average value of each input quantity.

4) Measurement result

$$Y = Y_N - \Delta_{trunc.},$$

where $Y_N = f(\bar{X}_1, \dots, \bar{X}_m)$.

Оценивание погрешности результатов измерения

1) Вычисление оценок СКО для каждой входной величины

$$\sigma(\bar{X}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij}^l - \bar{X}_i)^2}{n(n-1)}}$$

и для результатов измерений

(частные производные по каждой входной величине)

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma(\bar{X}_i) \right]^2}$$

2) Определение доверительного интервала случайной составляющей погрешности

для нормального распределения
(для $P_D = 0,95$):

или (для $P_D = 0,997$)

для распределения Стьюдента:

где $t_P(n)$ - квантили Стьюдента.

$$\Delta_p = 2 \cdot \sigma$$

$$\Delta_p = 3 \cdot \sigma$$

$$\Delta_p = t_P(n) \cdot \bar{\sigma}$$

3) Вычисление границ и СКР не исключенной систематической составляющей погрешности:

где: коэффициент $K=1,1$ при $P_D=0,95$,

$\Delta_{нс i}$ - определяется по известной информации (через класс точности).

$$\Delta_{нс} = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dx_i} \Delta_{нс i} \right)^2}$$

$$\sigma_{нс} = \frac{\Delta_{нс}}{\sqrt{3}K}$$

Estimation of the measurement results error

1) Calculation of root-mean-square deviation for each input quantity

and for the measurement results

(partial derivatives from each input quantity)

2) Determination of the confidence interval of an error random component

for normal distribution

($P_D = 0,95$)

or ($P_D = 0,997$) :

for Student's distribution:

where $t_P(n)$ - Student's quantiles.

3) Calculation of bounds and root-mean-square distribution of a non-eliminated systematic component of an error:

where: coefficient $K=1,1$ at $P_D=0,95$,

$\Delta_{нс i}$ - is defined by the known information (through the accuracy rating).

4) Вычисление СКО суммарной погрешности

5) Оценка влияния погрешностей измерения

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{HC}^2}$$

Если $\Delta_{HC} / \sigma < 0.8$, $\Delta_p = \overset{\circ}{\Delta}_p$ (систематической погрешностью пренебрегаем);

Если $0.8 \leq \Delta_{HC} / \sigma \leq 8$, $\Delta_p = \frac{\Delta + \overset{\circ}{\Delta}_{HC}}{\sigma + \sigma_{HC}} \sigma_{\Sigma}$ (погрешности соизмеримы);

Если $\Delta_{HC} / \sigma > 8$, $\Delta_p = \Delta_{HC}$ (случайной погрешностью пренебрегаем).

6) Представление результатов измерений

Результаты измерения обычно записываются в виде:

$$X_N, \Delta_p, P_D, \text{ где } \Delta_p = \pm \Delta X,$$

что означает, что интервал $(X - \Delta_p, X + \Delta_p)$ с вероятностью P_D содержит истинное значение измеренной величины.

Пример представления результата:

$$\text{а) } U = 105,0 \text{ В, } \Delta_{0,95} = \pm 1,5 \text{ В}$$

или б) $U = 105,0 \text{ В, } \Delta = \pm 1,5 \text{ В, } P_D = 0,95$.

Оценивание погрешности при однократном измерении

1). $i=1$ - измерения прямые, $j=1$ - измерения однократные,

$$X_N = X_{изм.} - \Delta_c,$$

$\Delta_p = \Delta_{max}$ определяется через класс точности.

Пример: Какой из вольтметров даст меньшую погрешность измерения напряжения, если $U_{изм} = 75 \text{ В}$, а данные приборов:

4) Calculation of root-mean-square deviation of a summary error

5) Estimation of the measurement errors influence

If $\Delta_{HC} / \sigma < 0.8$, $\Delta_p = \overset{\circ}{\Delta}_p$ (systematic error is neglected);

If $0.8 \leq \Delta_{HC} / \sigma \leq 8$, $\Delta_p = \frac{\Delta + \overset{\circ}{\Delta}_{HC}}{\sigma + \sigma_{HC}} \sigma_{\Sigma}$ (errors are comparable);

If $\Delta_{HC} / \sigma > 8$, $\Delta_p = \Delta_{HC}$ (random error is neglected).

6) Representation of the measurement results

The measurement results are usually presented in the following form:

$$X_N, \Delta_p, P_C, \text{ where } \Delta_p = \pm \Delta X,$$

it means that interval $(X - \Delta_p, X + \Delta_p)$ with probability P_C contains the true value of the quantity measured.

There is an example of the result representation:

$$\text{а) } U = 105,0 \text{ В, } \Delta_{0,95} = \pm 1,5 \text{ В}$$

or б) $U = 105,0 \text{ В, } \Delta = \pm 1,5 \text{ В, } P_D = 0,95$.

Error estimation at single determination

1). $i=1$ - direct measurements, $j=1$ - single determinations,

$$X_N = X_{изм.} - \Delta_c,$$

$\Delta_p = \Delta_{max}$ is determined through the accuracy rating.

An example: Which of the voltmeters gives less error of the voltage measurement if $U_{изм} = 75 \text{ В}$ and the instrument data are as follows:

$$U_{H1} = 150 \text{ В} \quad K=1,0$$

$$U_{H2} = 200 \text{ В} \quad K=1,0/0,5$$

$$\Delta_{max1} = \frac{K_1 U_{H1}}{100\%} = \frac{1,0 \cdot 150}{100\%} = 1,5 \text{ В}$$

$$U = 75,0 \text{ В} \quad , \quad \Delta U = \pm 1,5 \text{ В}$$

$$\delta_{max2} = c + d \left(\frac{U_{H2}}{U} - 1 \right) = 1,0 + 0,5 \left(\frac{200}{75} - 1 \right) = 1,8\%$$

$$\Delta_{max2} = \frac{\delta_{max2} U}{100\%} = \frac{1,8 \cdot 75}{100} = 1,4 \text{ В}$$

$$U = 75,0 \text{ В} \quad , \quad \Delta U = \pm 1,4 \text{ В}$$

2) однократные косвенные измерения ($i > 1, J=1$)

$$Y = Y_N, \quad \Delta_P$$

$$\Delta_P = K \sqrt{\sum_1^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta_{max i} \right)^2}$$

2) single indirect measurements ($i > 1, J=1$)

$$Y_N = f(X_1 - \Delta_{C1}, \dots, X_M - \Delta_{CM}) - \Delta_{mem}$$

если $Y = \sum X_i$, (аргументы складываются); то

$$\Delta_P = K \sqrt{\sum_1^m \Delta_{max i}^2}$$

if $Y = \sum X_i$, (arguments are added); then

если $Y = \frac{X_1 \dots X_l}{X_{l+1} \dots X_m}$, (аргументы умножаются или делятся), то

$$\delta_P = K \sqrt{\sum_1^m \delta_{max i}^2}$$

if $Y = \frac{X_1 \dots X_l}{X_{l+1} \dots X_m}$, (arguments are multiplied or divided),

then

$$\Delta_P = \frac{\delta_P Y}{100 \%}$$

(Δ_{max} и δ_{max} вычисляются через класс точности) с учетом корреляции,

$$\Delta(KX) = K \Delta_{max}$$

(Δ_{max} и δ_{max} are calculated through the accuracy rating

$$\delta(X^k) = K \delta_{max}$$

$$F = I^2, \quad \delta_F = 2 \delta_I$$

$$P_{3\phi} = 3P_\phi \quad \Delta_{P_{3\phi}} = 3 \Delta_{P_\phi}$$

Пример: Найти результат измерения сопротивления в схеме амперметра после вольтметра, если

$$U_H = 200B \quad K_V = 1,0/0,5 \quad R_V = 10 \text{ кОм}$$

$$I_H = 2A, \quad K_A = 1,0, \quad R_A = 1 \text{ Ом}$$

$$\text{Показание приборов: } U_X = 100 \text{ В} \quad I_X = 1 \text{ А}$$

Решение

$$\Delta_{мет} = R_A = 1 \text{ (Ом)}, \quad R_N = \frac{U_X}{I_X} - \Delta_{мет} = \frac{100}{1} - 1 = 99 \text{ Ом}, \quad \delta_I = \frac{K_I I_H}{I_X} = \frac{1,0 \cdot 2}{1} = 2 \%,$$

$$\delta_U = c + d \left(\frac{U_H}{U} - 1 \right) = 1,0 + 0,5 \left(\frac{200}{100} - 1 \right) = 1,5 \%, \quad \delta_R = \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2} = \sqrt{1,5^2 + 2,0^2} = 2,5 \%,$$

$$\Delta_R = \frac{\delta_R R_N}{100\%} = \frac{2,5 \cdot 99}{100} = 2,5 \text{ Ом}$$

Результат:

$$R = 99,0 \pm 2,5 \text{ Ом}$$

Answer:

An example: Find the result of resistance measurement in the scheme where the ammeter is after voltmeter, if

$$U_H = 200B \quad K_V = 1,0/0,5 \quad R_V = 10 \text{ kOhm}$$

$$I_H = 2A, \quad K_A = 1,0, \quad R_A = 1 \text{ kOhm}$$

$$\text{The instrument readings: } U_X = 100 \text{ V} \quad I_X = 1 \text{ A}$$

Solution

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Средство измерения – техническое средство, имеющее нормированные технические характеристики.

↓
Классификация средств измерений (по назначению):

- Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Мера не является устройством, с помощью которого можно измерять величину. Государственный эталон – самая точная мера. В настоящее время в Украине 46 государственных эталонов. Пример меры: мера ЭДС – нормальный элемент (стабилизированный гальванический элемент), мера сопротивления – катушки сопротивления (выполняются из манганина).

- Измерительные преобразователи служат для выработки сигнала измерительной информации путем преобразования величины по масштабу или по роду (делители напряжения, усилители и т.п.)

- Измерительные приборы – устройства, с помощью которых получают значение измеряемой величины.

- Измерительная установка – совокупность мер, преобразователей и приборов, объединенных одной функциональной схемой и предназначенных для организации измерений.

- Измерительные информационные системы – совокупность измерительных, вычислительных и вспомогательных технических средств для получения измерительной информации (диспетчерская электростанции – простейший пример).

Классификация измерительных приборов

Измерительные приборы можно классифицировать по различным признакам:

- Рабочие и образцовые;
- Показывающие и регистрирующие;
- Прямого преобразования и сравнения;

В приборах прямого преобразования осуществляется преобразование измерительной информации только в одном (прямом) направлении, а в приборах сравнения имеет место также и обратное преобразование информации.

MEASURING INSTRUMENTS

Measuring instrument is a technical gage having standardized features.

Measuring instrument classification (by application):

- A measure – is the instrumentation intended to reproduce the physical quantity of a preset magnitude.

A measure is not an instrument by means of which a quantity may be measured. A state standard is the most precise measure. At present time in Ukraine there are 46 state standards. Examples of a measure are emf measure is a standard cell (stabilized galvanic cell), a resistance measure – is a resistance coil (made of manganin).

- Measuring converters or transducers are to create a measure information signal by means of the quantity conversion by scale or by kind (potential dividers, amplifiers etc.).

- Measuring devices – are the ones by means of which the value of a measured quantity is obtained.

- Measuring plant – is totality of measures, transducers and devices combined by common functional diagram and intended for measuring.

- Measuring information systems – are the totality of measuring, computing and auxiliary technical gages to obtain the measure information (control room of an electric power station is the simplest example).

Classification of measuring instruments

Measuring instruments, may be classified by different signs:

- working and reference ones (calibrating instrument, primary instrument, standard instrument);
- indicating and recording ones;
- of direct conversion and of comparison;

In direct conversion devices the measure information conversion is realized only in forward direction and in comparison devices the measure information inversion takes place as well.

- Текущего (мгновенного) значения и интегрирующие (за определенный интервал времени);
- Стационарные и переносные;
- Аналоговые, цифровые, виртуальные;

В аналоговых приборах показания являются непрерывной функцией измеряемой величины (стрелочные приборы).

В цифровых приборах выходная величина представлена в виде дискретного сигнала об измерительной информации, приборы дают показания в цифровом виде.

Виртуальные приборы – это применение ЭВМ для получения измерительной информации.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

1) Функция преобразования – зависимость выходного параметра прибора от входного.

A_i – внешние параметры;

X – входная величина.

$$Y = f(X, A_1, A_2, \dots)$$

2) Чувствительность – производная выходной величины по входной (отношение изменения выходной величины к изменению входной величины).

если $S = const$ – шкала равномерная.

$$S = \frac{dX_{вых}}{dX_{вх}} = \frac{\Delta X_{вых}}{\Delta X_{вх}}$$

3) Порог чувствительности – минимальное значение измеряемой величины, на которое начинает реагировать прибор.

4) Постоянная прибора .

$$c = 1/S$$

5) Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы.

6) Диапазон измерения - область значений измеряемой величины, для которой нормированы допустимые погрешности средства измерения.

$$D = X_H - X_O$$

7) Класс точности , , .

$$K = |\gamma_{max}| \quad K = |\delta_{max}| \quad K = c/d$$

8) Вариация показаний

$$X_{вар} = X_{max} - X_{min}$$

9) Входное сопротивление или потребляемая мощность

$$P_{ном} = I_H^2 \cdot R_{вх} = U_H^2 / R_{вх}$$

- of current (instantaneous) value and integrating (for a fixed time interval) ones;
- stationary and portable ones;
- analog, digital, virtual ones;

In an analog instrument the readings are the continuous function from a quantity measured (a pointer indicator).

In a digital one the output quantity is presented in the form of a digital signal about the measure information, a digital device gives the readings in a numerical form.

Virtual ones – are the instrument when a computer is applied to obtain the measure information.

CHARACTERISTICS OF MEASURING INSTRUMENTS

1) Conversion function is the dependence of device output parameter of an input one.

A_i – external parameters;

X – input quantity.

2) Sensitivity is the derivative of an output quantity with respect to an input one.
in case of constant S , scale is uniform.

3) Threshold of sensitivity is the minimal value of a quantity measured, which a device responds to.

4) Device constant.

5) Scale interval – is the difference between two quantity values corresponding to two adjacent scale marks.

6) Meter range is the actual range of a measured quantity for which permissible errors of measuring instrument are standardized.

7) Accuracy rating , , .

8.) Reading variation

9) Input resistance or power requirement

10) Полная динамическая характеристика
(переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, АЧХ и ФЧХ, передаточная функция

$W(p) = \frac{X_{вых}(p)}{X_{вх}(p)}$ - отношение изображений выходных величин ко входным).

11) Частная динамическая характеристика
(время установления показаний, коэффициент демпфирования, резонансная угловая частота ω_o).

АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Структурная схема электромеханического прибора



Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой величины (X) в другую электрическую величину (Y), непосредственно воздействующую на измерительный механизм.

Измерительный механизм преобразует электрическую величину (Y) в механическое перемещение (угол поворота α) подвижной части.

При повороте подвижной части происходит изменение механической энергии:

$$dA = M_{вр} d\alpha = dW_m \quad \text{- энергия электромагнитного поля}$$

\swarrow работа \downarrow вращающий момент \searrow угол поворота

Вращающий момент: $M_{вр} = f(X, \lambda)$,

где X , λ , соответственно, измеряемая величина и параметр измерительного механизма.

$M_{вр} = \frac{dW_m}{d\alpha}$ - производная электромагнитной энергии по углу поворота.

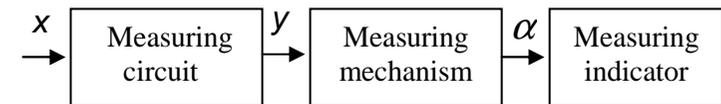
10) Total dynamic characteristic
(transient response, unit-impulse response, amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic, transfer characteristic

$W(p) = \frac{X_{out}(p)}{X_{in}(p)}$ is the ratio of an output quantity Laplace representation to input quantity.

11) Partial dynamic characteristic
(stabilization time, damping factor, resonance angular velocity ω_o).

ANALOG ELECTROMECHANICAL DEVICES

Block diagram of electromechanical device



A measuring circuit is to transform a measured quantity (X) into the other electrical quantity (Y) acting immediately on a measuring mechanism.

A measuring mechanism transforms an electrical quantity (Y) into a mechanical transference (deflection angle α) of movable part.

When the movable part deflects mechanical energy changes:

$$dA = M_w d\alpha = dW_m \quad \text{- energy of an electromagnetic field}$$

\swarrow work \downarrow torque \searrow deflection angle

Torque: $M_w = f(X, \lambda)$,

where X , λ a measured quantity and a parameter of a measuring mechanism, respectively.

$M_w = \frac{dW_m}{d\alpha}$ - derivative of on electromagnetic energy with respect to a deflection angle.

Противодействующий момент пропорционален углу поворота.

$$M_{np} = f(\alpha) = w_{\Pi} \alpha, \quad \text{где } w_{\Pi} - \text{удельный} \\ \text{противодействующий момент.}$$

При установившемся показании (равновесии моментов) $M_{np} = M_{вр}$

Отсюда уравнение преобразования

$$\alpha = M_{вр} / w_{\Pi} = f(X, \lambda) / w_{\Pi}$$

По способу создания вращающего момента различают шесть систем приборов: Магнитоэлектрическая (МЭ), электромагнитная (ЭМ), электродинамическая (ЭД), ферродинамическая (ФД), электростатическая, индукционная (ЭС).

По способу создания противодействующего момента приборы делятся на две группы:

- 1) С механическим противодействующим моментом
- $$M_{np} = D\alpha.$$

Противодействующий момент создается с помощью спиральных пружин, растяжек, подвеса.

D -удельный противодействующий момент.

- 2) С электрическим противодействующим моментом.

Противодействующий момент создается с помощью дополнительной катушки, по которой протекает ток.

Уравнение движения подвижной части прибора:

$$M_u + M_y + M_{np} = M_{вр}$$

$$M_u = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - \text{момент сил инерции,}$$

J - коэффициент инерции.

$$M_y = P \frac{d\alpha}{dt} - \text{момент успокоения,}$$

P - коэффициент успокоения, пропорциональный угловой скорости.

$M_{вр}, M_{np}, M_u, M_y$ - моменты, действующие в приборе.

A counter torque is proportional to a deflection angle.

$$M_t = f(\alpha) = w_{\Pi} \alpha, \quad \text{where } w_{\Pi} - \text{specific counter} \\ \text{torque.}$$

At a steady-state reading (torque balance) $M_t = M_w$

From here the scale equation (transformation equation) is obtained:

$$\alpha = M_w / w_{\Pi} = f(X, \lambda) / w_{\Pi}$$

Six instrument systems are distinguished by manner of torque creation: Magnetolectric (Permanent-magnet, moving-coil), Electromagnetic (moving-iron), Electrodynamic, Ferrodynamic (iron-cored electrodynamic), Electrostatic, Induction.

By manner of counter torque creation devices are divided into two groups:

- 1) With an mechanical counter torque

$$M_t = D\alpha.$$

Counter torque is created by means of spiral springs, guywires (taut bands), hangers (ligament).

D -specific counter torque.

- 2) With an electrical counter torque.

Counter torque is created by means of an additional current carrying coil.

The motion equation of a movable part of a device is:

$$M_i + M_d + M_t = M_w$$

$$M_i = J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - \text{a moment of the inertia forces,}$$

J - inertial coefficient.

$$M_d = P \frac{d\alpha}{dt} - \text{damping torque,}$$

P - damping coefficient proportional to an angular velocity.

M_w, M_t, M_i, M_d - moments acting in a device.



Уравнение движения представляет собой дифференциальное уравнение 2-го порядка. В зависимости от вида корней характеристического уравнения, стрелка прибора будет вести себя по-разному.

Важной динамической характеристикой является частота собственных колебаний

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (\text{обычно} < 10 \text{ Гц}).$$

При $f_x > f_o$ подвижная часть реагирует на среднее значение, так как не успевает реагировать на мгновенное значение.

При $f_x < f_o$ подвижная часть реагирует на мгновенное значение момента и стрелка будет колебаться с частотой входного сигнала.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия основан на взаимодействии тока катушки (рамки) с магнитным полем постоянного магнита.

Motion equation represents differential equation of second order. Depending on form of the roots of the characteristic equation the device pointer will behave differently.

Frequency of natural oscillations is an important dynamic characteristic

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{J}} \quad (\text{usually} < 10 \text{ Гц}).$$

At $f_x > f_o$ a movable part reacts to an average value, because it doesn't manage to react to an instantaneous value.

At $f_x < f_o$ a movable part reacts to an instantaneous value and the pointer will oscillate with the frequency of an input signal.

PERMANENT-MAGNET, MOVING-COIL INSTRUMENTS

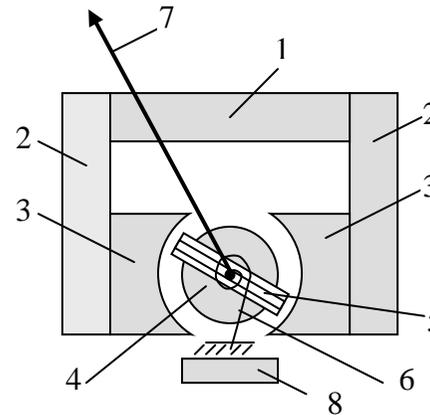
Their action is based upon the interaction between the coil current and the magnetic field of the permanent magnet.

Конструктивное исполнение измерительного механизма:

- 1) С подвижной катушкой и неподвижным магнитом.
- 2) С подвижным магнитом и неподвижной катушкой.

Наиболее распространен измерительный механизм с подвижной катушкой, устройство которого показано на рисунке.

Постоянный магнит 1, магнитопровод-2 с полюсными наконечниками 3 составляют магнитную систему механизма. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником 4 создается равномерное радиальное магнитное поле, в котором находится прямоугольная катушка (рамка) 5. Катушка закреплена на оси с помощью спиральных пружин 6, которые служат для создания противодействующего момента и также они используются для подачи измеряемого тока от выходных зажимов в рамку. Рамка жестко соединена со стрелкой 7. Для изменения чувствительности механизма используется магнитный шунт 8 (за счет перераспределения магнитного потока).



The embodiment of a measuring mechanism is:

- 1) With a movable coil and an immovable magnet.
- 2) With a movable magnet and an immovable coil.

The most widely used is the measuring mechanism with a movable coil, whose arrangement is shown in the figure.

A permanent magnet 1, a magnetic core 2 with magnetic enhances 3 make up a magnetic circuit of a mechanism. In the air gap between the magnetic enhances and the core 4 a uniform radial magnetic field is created, where a rectangular current-carrying coil (frame) 5 is situated. The coil is fixed on the axis by means of spiral springs 6, which are to create the counter torque and they are also used for measuring current supply from output terminals into the frame. The frame is rigidly connected with the pointer 7. To change the mechanism sensitivity, magnetic shunt 8 is used (owing to magnetic flux redistribution).

Энергия магнитного поля, взаимодействующая с катушкой:

$$W_m = \Psi I = BS w \alpha I, \quad B = const$$

Вращающий момент определяется изменением энергии магнитного поля:

$$M_{ep} = \frac{dW_m}{d\alpha} = BS w I$$

Противодействующий момент:

$$M_{np} = D\alpha$$

где: D - удельный противодействующий момент;

α - угол поворота.

Получим уравнение преобразования из которого следует, что угол поворота подвижной части пропорционален току, протекающему по рамке:

$$\alpha = \frac{BS w}{D} I = s_I I$$

где: B - индукция магнитного поля в зазоре,

S - площадь катушки,

w - число витков в катушке,

I - ток в катушке,

s_I - чувствительность к току.

D - удельный противодействующий момент

The energy of the magnetic field interacting with the coil is:

The torque is determined by variation of the magnetic field energy:

The counter torque is:

where: D - specific counter torque;

α - deflection angle.

Let's obtain transformation equation whereof it follows that the deflection angle of a movable part is proportional to the current flowing through the frame:

where: B - induction of the magnetic field in the air gap,

S - the coil area,

w - number of coil turns,

I - current in the coil,

s_I - current sensitivity,

D - specific counter torque.

Приборы, в которых противодействующий момент создается с помощью дополнительной катушки, по которой протекает ток, называются логометрами – измерители отношения: $M_{np} = f(Y, \alpha)$.

Уравнение шкалы логометра: $\alpha = f(X/Y)$. Стрелка такого прибора при его отключении находится в произвольном положении.

Магнитоэлектрический логометр содержит две катушки (1, 2), укрепленные на оси со стрелкой. Токи в рамках создают два противоположно направленных вращающих момента. Конструкция логометра предусматривает неравномерность магнитного потока в зазоре ($B = var$) между полюсными наконечниками постоянного магнита и сердечником. Эта неравномерность достигается приданием особой формы наконечникам и сердечнику.

Зазор неравномерен, моменты разные

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

$$M_2 = B_2(\alpha) S_2 w_2 I_2$$

В режиме равновесия

$$M_1 = M_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2(\alpha) S_2 W_2}{B_1(\alpha) S_1 W_1} = f(\alpha)$$

Уравнение преобразования

$$\alpha = f(I_1 / I_2)$$

Свойства магнитоэлектрических приборов

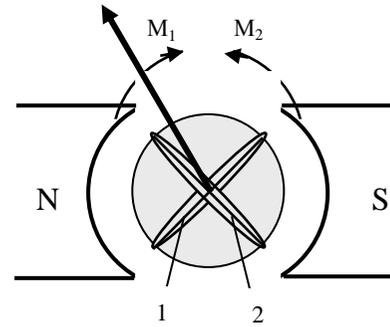
Преимущества:

- 1) высокая точность (самые точные из электромеханических)
- 2) высокая чувствительность
- 3) малая потребляемая мощность
- 4) равномерная шкала во всем диапазоне.

Недостатки:

- 1) нельзя использовать для измерения переменных токов
- 2) при изменении знака тока стрелка меняет положение $\alpha = s_I I$;
- 3) в цепях \sin тока стрелка укажет на «О»;
- 4) в цепях $nesin$ тока измеряют постоянную составляющую тока цепи.
- 5) малая перегрузочная способность.

Instrument, in which counter torque is created by means of an supplementary carrying-current coil, is referred a logometer (ratiometer): $M_t = f(Y, \alpha)$. Logometer scale equation is : $\alpha = f(X/Y)$. The pointer of such an instrument at rest is situated in an arbitrary position.



Permanent-magnet logometer contains two coils (1, 2) fixed on an axis with the pointer. Coil currents create two opposite torques. Logometer construction stipulates for the magnetic flux non-uniformity in the air gap ($B = var$) between the magnetic enhancers of the permanent magnet and the core. This non-uniformity is reached using specially shaped enhancers and core.

The air gap is non-uniform, moments are different

In the equilibrium conditions

The transformation equation is

Properties of moving-coil instruments

Advantages:

- 1) high accuracy (the most precise among the electromechanical instruments)
- 2) fast response
- 3) small power requirement
- 4) uniform scale at full range.

Disadvantages:

- 1) can't be used to measure alternating currents
- 2) at change of sign, the pointer changes direction of rotation $\alpha = s_I I$;
- 3) in circuits of sinusoidal current it will read zero;
- 4) in circuits of nonsinusoidal current it will only measure the direct-current component.
- 5) small surge capability (overload capacity).

ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Это приборы сочетающие использование полупроводникового выпрямителя и магнитоэлектрического измерительного механизма с отсчетным устройством.

При использовании двухполупериодного выпрямления (а) ток проходит через измерительный механизм в обе половины периода и, следовательно, чувствительность таких схем выше, чем у однополупериодных (б).

При использовании выпрямительных приборов в цепи переменного тока при частотах больше собственной частоты измерительного механизма положение указателя определяется не мгновенным значением тока, а его средним значением (вследствие инерционности).

Тогда уравнение преобразования имеет вид:
 где: s_I, I_{cp} - соответственно, чувствительность прибора к

$$\alpha = \frac{BSw}{Dk_{\phi}} I$$

току и среднее значение тока.

Таким образом, прибор выпрямительной системы измеряет среднее значение переменного тока, однако его шкала градуируется в действующих значениях синусоидального тока.

Уравнение преобразования выпрямительного прибора:

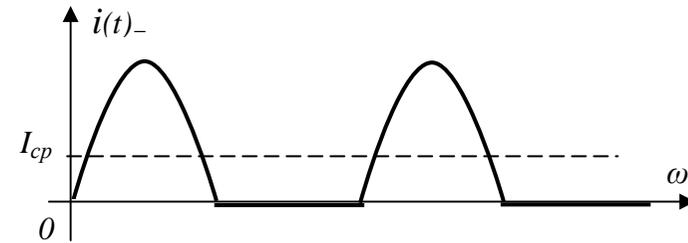
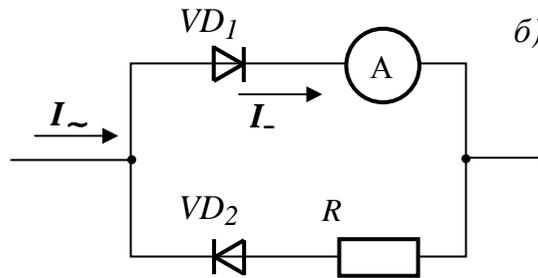
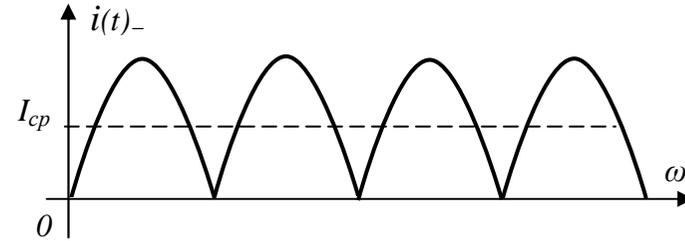
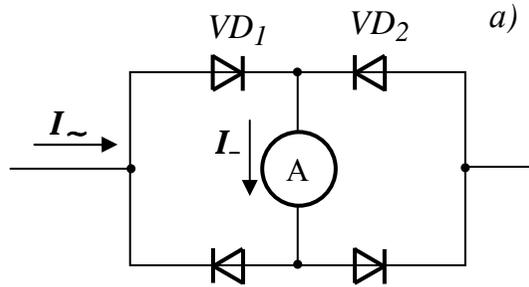
$$\alpha = \frac{BSw}{D} I_{cp} = s_I I_{cp}$$

где: $K_{\phi} = \frac{I}{I_{cp}}$ - коэффициент формы кривой,

RECTIFIER-TYPE INSTRUMENTS

These are the instruments combining the usage of a semiconductor rectifier with moving-coil measuring mechanism.

When using full-wave rectifier (bridge rectifier) (a) current flows



through the measuring mechanism during both half-periods and, consequently, sensitivity of such schemes is higher than that of a half-wave circuit (б).

When using rectifier-type instruments in a-c circuit at frequencies higher than natural frequency of a measuring mechanism, the pointer position is determined by not instantaneous current value but its average value (owing to lag effect).

Then the transformation equation has a form:

where: s_I, I_{av} - current sensitivity of the device and the average value of current, respectively.

Thus, a rectifier-type instrument measures an average current in a.c. circuits, their scales are graduated to read the effective (rms) values of sinusoidal current.

The transformation equation of a rectifier-type instrument is:

where: $K_F = \frac{I}{I_{av}}$ - form factor of a curve,

$$K_{\phi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \text{ - для схемы двухполупериодного выпрямления,}$$

$$K_{\phi} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22 \text{ - для схемы однополупериодного выпрямления.}$$

В приборах выпрямительной системы используется равномерная шкала, за исключением начального уплотненного участка (составляющего 10-15 % от полной длины шкалы), который проградуирован по квадратичному закону.

Свойства:

- Высокая чувствительность.
- Малое потребление мощности, но невысокая точность.
- Частотный диапазон до 15 кГц, дальше сказываются емкостные свойства диодов.
- Пригодны для измерения в цепях переменного тока только синусоидальной формы.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Термоэлектрические приборы состоят из термоэлектрического преобразователя, преобразующего измеряемый переменный ток высокой частоты в постоянное напряжение, и магнитоэлектрического измерительного механизма. Термопреобразователь включает в себя нагреватель, по которому протекает измеряемый ток и термопару, которая находится в тепловом контакте с нагревателем. Постоянное напряжение, вырабатываемое термопарой, воздействует на магнитоэлектрический микроамперметр.

Свойства:

- возможность измерения постоянного и переменного тока;
- малая зависимость показаний от формы кривой тока и частоты (до 100 МГц).

Недостатки:

- невысокая чувствительность и точность (класс точности 1.0 - 4.0);
- большая потребляемая мощность;
- малая перегрузочная способность;
- квадратичная шкала в начале диапазона измерений.

$$K_{\phi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \text{ - at full-wave rectification,}$$

$$K_{\phi} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2,22 \text{ - at half-wave rectification.}$$

Rectifier-type instruments use a uniform scale except for the initial crowded part (accounting for 10–15 % of total scale length), which has a square-law shape.

Properties:

- Fast response.
- Small power requirement, but low precision.
- Frequency range up to 15 kilohertz, further capacitive qualities of the diodes start affect adversely.
- They are only suitable for measurement in circuits of sinusoidal current.

INSTRUMENTS OF THERMOELECTRIC MEASURING SYSTEM

Thermoelectric instruments consist of a thermoelectric converter, transforming measured alternating current of high frequency into direct voltage, and moving-coil measuring mechanism. A thermoelectric converter includes a carrying-current heater and a thermocouple, which is in thermal contact with the heater. The direct voltage induced by a thermocouple acts on a permanent-magnet microammeter.

Properties:

- possibility to make measurements in D-C and A-C circuits;
- small dependence of readings on the form of the current curve and frequency (to 100 megahertz).

Disadvantages:

- low sensitivity and accuracy (accuracy rating 1.0 - 4.0);
- high power requirement;
- low surge capability (overload capacity);
- square-law scale at the beginning of the scale range.

Область применения магнитоэлектрических приборов

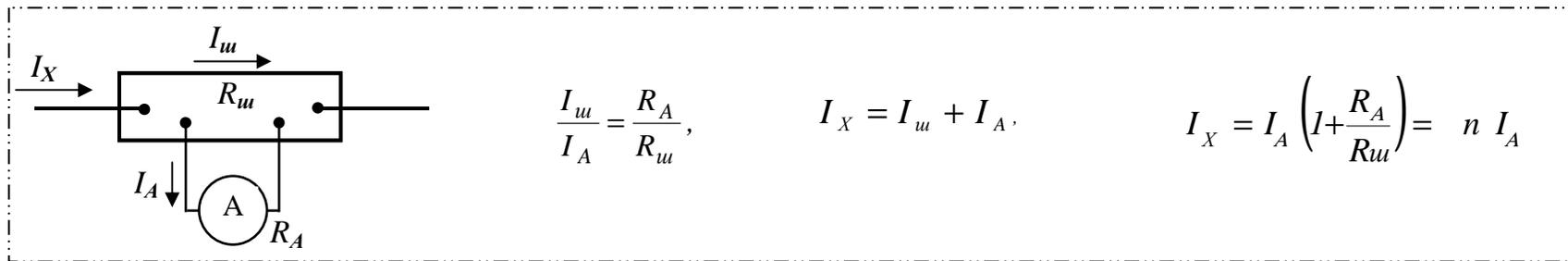
Применяются в качестве амперметров и вольтметров для стационарных и лабораторных измерений, в качестве омметров и гальванометров.

Выпрямительные приборы применяются в качестве комбинированных многопредельных приборов для измерения в цепях постоянного и *sin* токов промышленной и повышенной частоты.

Термо-электрические приборы применяются в цепях переменного тока как низкой, так и очень высокой частоты.

Пределы измерения магнитоэлектрических приборов расширяют по току (с помощью шунтов) и по напряжению (с помощью добавочных резисторов).

Шунт включается параллельно амперметру



Выбор шунта:

$$R_u = \frac{R_A}{n - 1}$$

Choice of shunt: ,

$$n = \frac{I_X}{I_A}$$

коэффициент шунтирования :

$$n = \frac{I_X}{I_A}$$

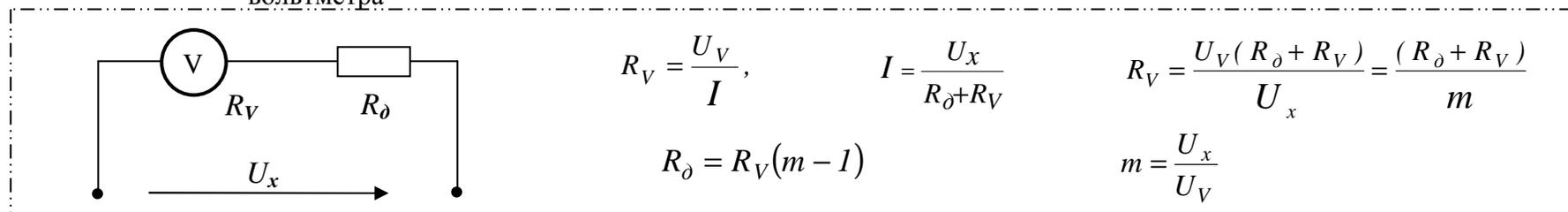
coefficient of shunting,

I_A – предельный ток амперметра.

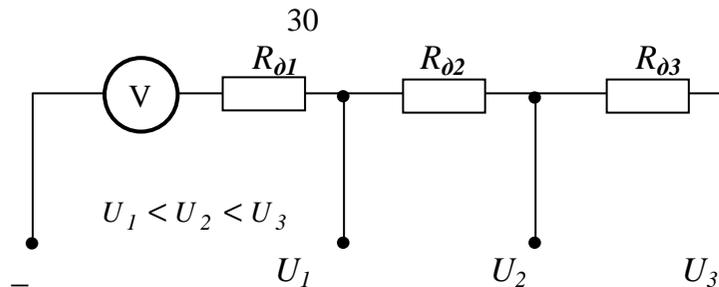
I_A – critical current of an ammeter.

Выбор добавочного сопротивления для магнитоэлектрического вольтметра

Choice of an auxiliary resistor for permanent-magnet voltmeter



Многопредельный вольтметр
 $R_{\partial 1}, R_{\partial 2}, R_{\partial 3}$ - добавочные
 сопротивления



Multirange voltmeter
 $R_{\partial 1}, R_{\partial 2}, R_{\partial 3}$ - auxiliary resistances

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки с подвижным сердечником.

Конструктивные варианты:

- 1) плоская катушка;
- 2) круглая катушка;
- 3) с замкнутым магнитным приводом.

Уравнение преобразования:

L – индуктивность катушки;

I – действующее значение тока.

$$\alpha = \frac{I}{2D} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I$$

Шкала нелинейная, но если подобрать чтобы $\frac{dL}{d\alpha}$ имела обратно

квадратичную зависимость, шкалу можно выровнять.

Свойства: - измерение постоянного и переменного тока любой формы;

- высокая надежность;
- невысокая точность;
- большое собственное потребление.

Область применения: в качестве стационарных амперметров и вольтметров для измерения в цепях промышленной частоты (до 1,5 кГц).

Пределы измерений расширяют по току с помощью измерительных трансформаторов тока, по напряжению до 900В добавочными сопротивлениями, свыше – измерительные трансформаторы напряжения.

ELECTROMAGNETIC INSTRUMENTS

Their action is based upon the interaction between the magnetic field of an immovable coil and movable ferromagnetic core.

Design modifications:

- 1) spider-web coil;
- 2) round coil;
- 3) with a closed core.

The transformation equation is:

L – coil inductance;

I – effective value of current.

The scale is non-linear, but if we choose $\frac{dL}{d\alpha}$ so as to have an inversely quadratic dependence, then the scale may become a uniform one.

Properties - measurement of direct and alternating currents of any form;
 - high reliability;
 - low precision;
 - high own power requirement.

Field of application: as stationary ammeters and voltmeters for measurement in circuits of commercial frequency (power frequency) (up to 1.5 kilohertz).

Current ranges are widened by means of current measuring transformer, and voltage range up to 900V by means of auxiliary resistors and over – by means of a voltage measuring transformer.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧНЫЕ ПРИБОРЫ

Две катушки: одна – неподвижная, вторая – подвижная.

Принцип основан на взаимодействии магнитных полей подвижной и неподвижной катушек с токами.

Магнитная энергия запасенная в приборе:

$$W_{эм} = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M_{12} i_1 i_2$$

мгновенный вращающий момент:

$$m = \frac{dW_{эм}}{d\alpha} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

если

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

тогда:

$$m = \frac{1}{2} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_{1m} I_{2m} (\cos(\psi) - \cos(2\omega t - \psi))$$

Средний вращающий момент:

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos \psi$$

Уравнение преобразования:

где: I_1, I_2 - действующие значения токов.

Форма токов не влияет на показания.

Свойства:

- работа в цепях постоянного и переменного тока любой формы (f =до 10 кГц);
- самая высокая точность при измерениях переменного тока;
- высокая стабильность свойств с течением времени;
- невысокая чувствительность и малый вращающий момент, так как магнитные потоки замыкаются во воздухе;
- повышенное потребление энергии;
- невысокая перегрузочная способность(ток протекает по пружинкам).

Применение: в качестве лабораторных приборов А, V, W фазометров и частотомеров в цепях ~ тока.

Пределы измерений расширяются с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

INSTRUMENTS OF ELECTRODYNAMIC SYSTEM

There two coils: movable and immovable.

Their action is based upon the interaction between the magnetic fields of movable and immovable carrying currents coils.

Magnetic energy stored in a device is:

the instantaneous torque is:

if , ,

then:

The average torque is:

The transformation equation is:

where: I_1, I_2 - effective values of currents.

The current form do not influence instrument readings.

Properties:

- can work in DC and AC circuits with currents of any form (frequency up to 10 kilohertz);
- the highest precision when AC measuring;
- high stability of properties in time;
- low sensitivity and small torque because magnetic fluxes flow through air, and as a consequence there is an increased power requirement.
- low overload capability (because of current flowing through the small springs).

Application: as laboratory instruments A, V, W, phasometer, frequency meter in AC circuits.

Measurement limits are widened by means of current and voltage measuring transformers.

ФЕРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Отличаются от электродинамических (ЭД) приборов тем, что неподвижная катушка помещена на ферромагнитный сердечник для усиления магнитного потока.

По сравнению с ЭД приборами значительно увеличен вращающий момент, но резко снижена точность измерения и частотный диапазон.

Уравнение преобразования такое же, как и у ЭД приборов.

Применение: щитовые приборы для переменного тока промышленной частоты и самописцы.

Расширение пределов измерений выполняется с помощью измерительных трансформаторов.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия – электростатическое взаимодействие заряженных пластин или проводников.

Конструкция: неподвижные и подвижные пластины или проводники.

Варианты:

- с изменением активной поверхности взаимодействия;
- с изменением расстояния между проводниками.

Энергия электростатического поля:

$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} CU^2$$

Уравнение преобразования:

где: U - действующее значение напряжения.

Свойства:

- измерение постоянного и переменного напряжения любой формы;
- внутреннее сопротивление очень велико (10^{14} Ом);
- ничтожное потребление энергии;
- широкий частотный диапазон (10^7 Гц);
- невысокая точность;
- низкая перегрузочная способность (подвесы);
- низкая чувствительность.

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{dC}{d\alpha} U^2$$

FERRODYNAMIC INSTRUMENTS

They differ from electrodynamic instruments by an immovable coil being situated on the ferromagnetic core to strengthen the magnetic flux.

In comparison with electrodynamic instruments the torque is greatly increased but the measurement precision and frequency range are noticeably decreased.

The transformation equation is the same as for electrodynamic instruments.

Fields of application are: panel meters for alternating current of commercial frequency and self-recorders.

Widening of the measurement limits is made by means of measuring transformers.

ELECTROSTATIC INSTRUMENTS

Their action is based on electrostatic interaction between charged plates or charged conductors.

They contain movable and immovable plates or conductors.

Design variants are:

- with variation of active surface of interaction;
- with variation of distance between the conductors.

The electrostatic field energy is:

The transformation equation is:

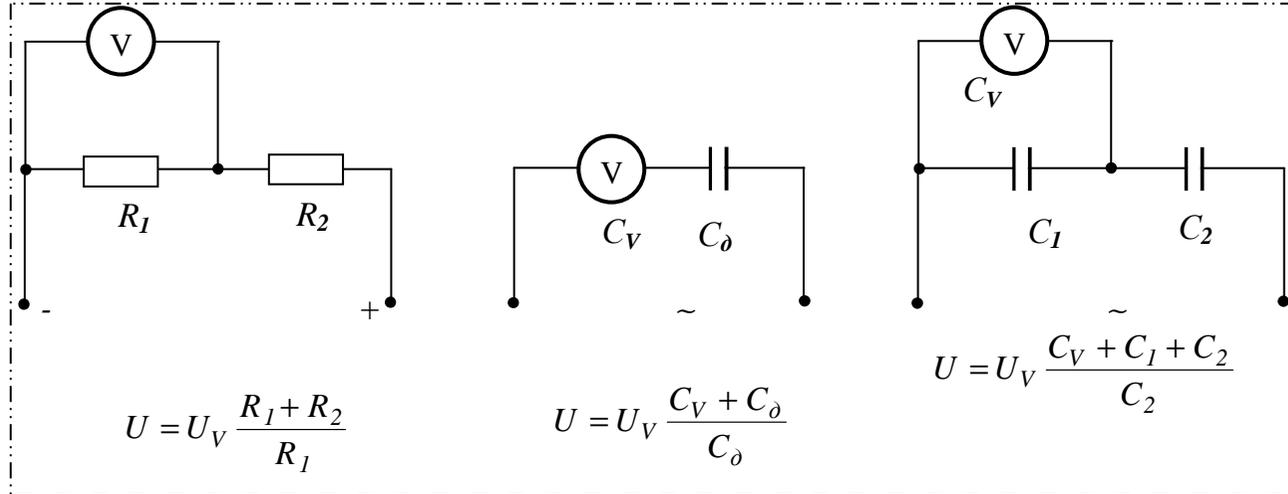
where: U - effective value of voltage.

Properties:

- measurement of alternating voltage of any form;
- very big inner resistance (10^{14} Ohm);
- negligible power requirement;
- wide frequency range (10^7 Hertz);
- low precision;
- low surge capability (owing to pendants);
- low sensitivity.

Применяют в качестве V в широком диапазоне частот и в маломощных цепях постоянного и переменного тока (прямое включение от 1,5В до 300 кВ).

Расширение пределов измерения осуществляется с помощью активных делителей напряжения на постоянном токе и емкостных на переменном токе.



The instruments of this type are applied as voltmeter in wide frequency range and in low-power DC and AC circuits (direct connection at voltage from 1.5V to 300 kV).

The widening of the measurement limits is made by means of active voltage dividers (potentiometers) in DC circuit and capacitive dividers in AC circuit.

ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия приборов основан на взаимодействии переменных магнитных потоков с вихревыми токами, наведенными этими потоками в подвижном диске из алюминия.

Изучить самостоятельно (см. литературу).

INDUCTION INSTRUMENTS

Instrument action is based upon the interaction between alternating magnetic fluxes and eddy currents induced by these fluxes in a movable aluminium disc.

This material is for self-studying (see the literature).

ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

К приборам этого типа относятся: измерительные мосты, компенсаторы (потенциометры). Это электрическая схема, состоящая из сопротивлений (плечи моста), источников питания, измерительного прибора. Измерительные мосты служат для измерений омического сопротивления, емкости, индуктивности и других величин.

По принципу работы бывают:

- неуравновешенные мосты - $I_{\Gamma} = f(R)$,
- уравновешенные мосты - $I_{\Gamma} = 0$.

Уравновешенные мосты постоянного тока

R_1, R_2, R_3, R_4 - плечи моста,

cd - измерительная диагональ,

ab - диагональ питания.

Мост называется уравновешенным, если разность потенциалов между точками c и d равна нулю (ток гальванометра равен нулю).

Ток в измерительной диагонали (по МЭГ):

$$I_{\Gamma} = \frac{U_{ab}(R_1R_4 - R_2R_3)}{R_{\Gamma}(R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1R_2(R_3 + R_4) + R_3R_4(R_1 + R_2)}$$

$I_{\Gamma} = 0$ при $R_1R_4 = R_2R_3$ - условие равновесия.

Произведения сопротивлений противоположных плеч моста равны - условие равновесия. Измерительный прибор - магнитоэлектрический гальванометр самый чувствительный индикатор нуля (из механических приборов).

Если положить, что сопротивление одной из ветвей неизвестно: $R_1 = R_x$, тогда

R_3 - плечо сравнения (выполняется в виде многодекадного магазина сопротивлений),

R_2, R_4 - плечи отношения.

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_4}$$

COMPARING INSTRUMENTS

Instruments of this type include measuring bridges and compensators (potentiometers). This is an electrical scheme consisting of resistors (bridge branches), power sources, measuring instrument.

Measuring bridges are used to measure ohmic resistance, capacity, inductance and other quantities.

By principle of their operation the bridges can be:

- unbalanced bridges - $I_{\Gamma} = f(R)$,
- balanced bridges - $I_{\Gamma} = 0$.

Balanced d-c bridges

R_1, R_2, R_3, R_4 - bridge branches,

cd - measuring diagonal,

ab - supply diagonal.

A bridge is balanced, when the potential difference between junctions c and d is zero (galvanometer shows zero).

The current in a measuring diagonal (according to the method of equivalent generator):

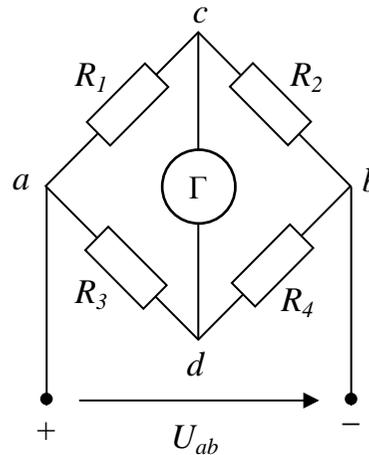
$I_{\Gamma} = 0$ at $R_1R_4 = R_2R_3$ - equilibrium condition.

The products of opposite bridge branches resistances are identical to equilibrium condition. The measuring instrument is a moving-coil galvanometer, which is the most sensitive zero instrument (among mechanical measuring instruments).

If the resistance of one branch is assumed to be unknown: $R_1 = R_x$, then

R_3 - a comparison arm (made in the form of multidecade resistance box),

R_2, R_4 - a ratio arm.



Для уменьшения влияния сопротивления контактов и соединительных проводов используют схему одинарного моста с четырьмя зажимами, которая показана на рисунке.

В этом случае влияние сопротивления проводов и контактов r_2 и r_4 практически исключается (поскольку $R_2 \gg r_4$, $R_3 \gg r_2$). Также исключается влияние сопротивления проводов и контактов r_1 и r_3 , так как они включены в диагонали моста и не участвуют в условии равновесия моста.

Схему одинарного моста с 4-мя зажимами используют для измерения сопротивлений меньше 10 Ом.

Основные характеристики:

диапазон измерения от 10^{-8} Ом до 10^{10} Ом.

чувствительность измерительного моста $S_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R}$,

$\Delta\alpha$ - изменение положения указателя (выходная величина),
 ΔR - входная величина.

Двойные мосты постоянного тока

Схема двойного моста используется для измерения очень малых сопротивлений с высокой точностью.

В этих схемах влияние сопротивления соединительных проводов и контактов минимально. Необходимые условия:

$$R_1 = R_3, \quad R_2 = R_4$$

(т.е. $R_1/R_3 = R_2/R_4$).

$$R_1 \gg r_1, \quad R_3 \gg r_3$$

(обычно $R_1, \dots, R_4 \approx 1000$ Ом),

$R \rightarrow 0$ - толстая медная шина.

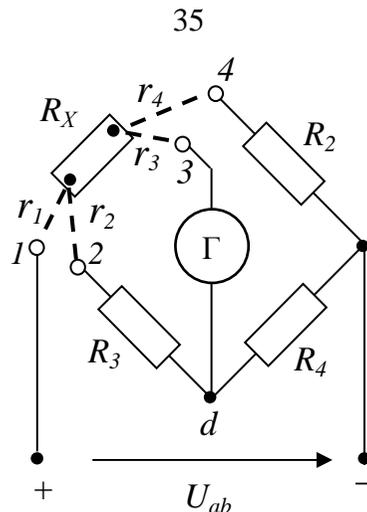


Схема одинарного моста для 4-х зажимного подключения

To reduce the resistance effect of contacts and connecting wires, one uses Wheatstone bridge with four terminals shown in the figure.

In this case the resistance effect of wires and contacts r_2 and r_4 is almost left out (as $R_2 \gg r_4$, $R_3 \gg r_2$). The resistance effect of wires and contacts r_1 and r_3 is left out too, because they are in bridge diagonals and do not take part in the equilibrium condition of the bridge.

Wheatstone bridge with four terminals is used to measure resistances less than 10 Ohms.

The general properties are:

the meter range is from 10^{-8} Ohm to 10^{10} Ohm.

The measuring bridge sensitivity is: $S_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta R}$,

$\Delta\alpha$ - indicator deflection (output quantity),
 ΔR - input quantity.

Double d-c bridges

Double bridge scheme is used to measure very small resistances with high accuracy.

In this scheme the resistance effect of connecting wires and contacts is minimal. The necessary conditions are:

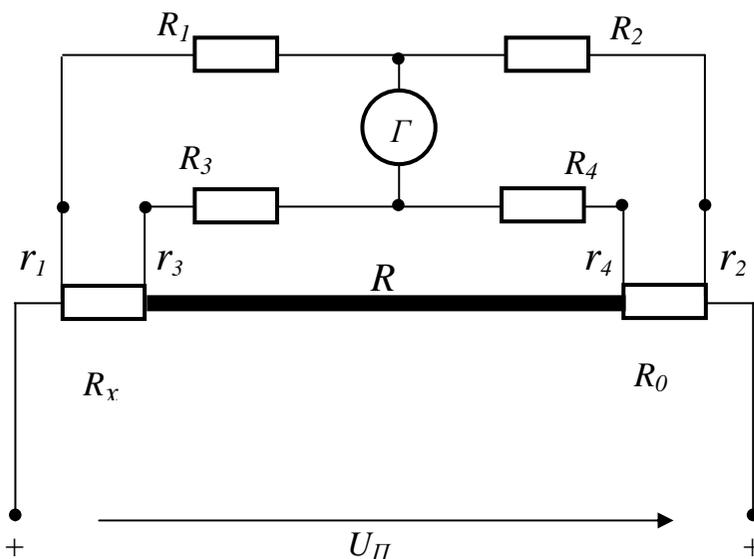
$$R_1 = R_3, \quad R_2 = R_4$$

(т.е. $R_1/R_3 = R_2/R_4$).

$$R_1 \gg r_1, \quad R_3 \gg r_3$$

(usually $R_1, \dots, R_4 \approx 1000$ Ом),

- $R \rightarrow 0$ - thick copper bus.



R_x - измеряемое сопротивление,
 R_o - образцовое сопротивление.

$$R_x = R_o \frac{R_1}{R_2}$$

R_x - resistance measured,
 R_o - standard resistance.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МОСТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Используются для измерения параметров конденсаторов, катушек индуктивности, взаимоиндуктивностей.

Определение активных и реактивных параметров цепи:

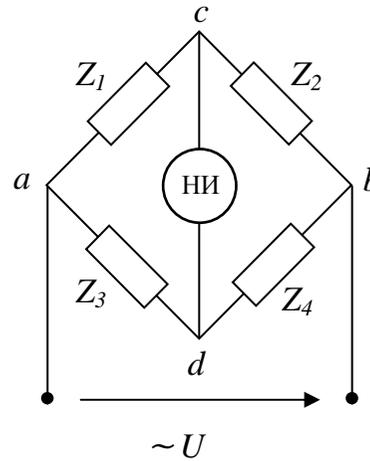
$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 = Z_1 e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 e^{j\varphi_4} = Z_2 e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 e^{j\varphi_3}$$

Условие равновесия:

$$\begin{cases} Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases}$$

Для того, чтобы уравновесить мост при переменном токе два плеча выбирают чисто активными $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$.

Если измеряемое сопротивление индуктивное, то в противоположное плечо включается емкость.



$$Z_x = Z_1 = Z_2 \frac{Z_3}{Z_4}$$

$$\varphi_x = \varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4$$

MEASURING IMPEDANCE BRIDGES

They are used to measure parameters of capacitors, inductive coils, mutual inductances.

The definition of active and reactive circuit parameters is:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 = Z_1 e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 e^{j\varphi_4} = Z_2 e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 e^{j\varphi_3}$$

Equilibrium condition:

$$\begin{cases} Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases}$$

To make an impedance bridge balanced, two bridge arms are made purely resistive $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$.

If measured impedance has inductive character then the capacitance is inserted into an opposite bridge arm.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОСЦИЛОГРАФ

Предназначен для визуального наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов.

Типы: - универсальные С1 (до 100 МГц); - импульсные С3 (до 10 ГГц);
- скоростные С7; - стробоскопические С7 (очень коротко импульсные);
- запоминающие С8; - специальные С9.

Основной узел электронно-лучевого осциллографа (ЭЛО) – электронно-лучевая трубка (ЭЛТ).

Принцип действия (ЭЛО) основан на создании направленного потока электронов и электростатическом управлении им.

Простейшая ЭЛТ представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух и в котором расположен подогреваемый катод К, являющийся источником пучка электронов; модулятор М, управляющий потоком электронов; ускоряющий электрод A_1 , служащий для разгона электронов; фокусирующий электрод A_2 , позволяющий сфокусировать луч; анод A_3 (высокого напряжения), служащий для дополнительного ускорения электронов; две пары отклоняющих пластин $ОП_X$ и $ОП_Y$, одна для горизонтального и одна для вертикального отклонения луча, пропорционально соответствующим напряжениям на пластинах и люминесцентный экран Э, находящийся на внутренней поверхности баллона. Электроды составляют электронную пушку, которая создает электронный луч (пучок) и направляет его к экрану. Бомбардировка экрана пучком электронов повышает и флюоресценцию (излучение света в момент бомбардировки), и фосфоресценцию (излучение света после бомбардировки). Изменение напряжения смещения на модуляторе М и ускоряющее напряжение на A_1 определяют размер и интенсивность светового пятна.

На рисунке также показана упрощенная схема управления начальной установкой луча по оси Y (по оси X управление аналогичное).

CATHODE-RAY OSCILLOGRAPH

It is intended for visual observation, measurement and electric signal recording.

The types of oscillographs are: - universal C1 (to 100 MHz); - impulse C3 (to 10 GHz); - high-speed C7; - stroboscopic C7 (very short-impulse); - memory (storage) C8; - special C9.

The main element of a cathode-ray oscillograph is a cathode-ray tube.

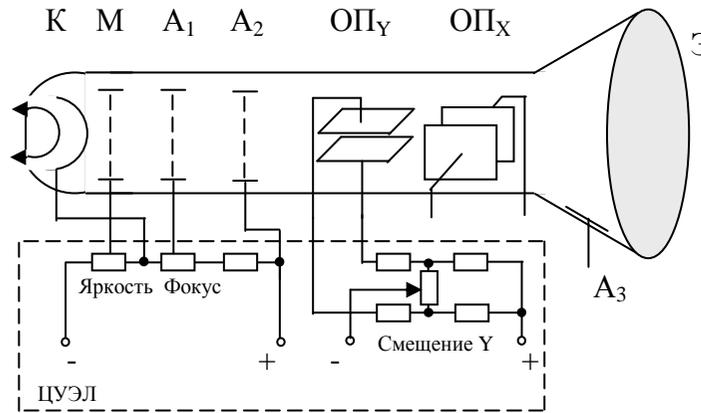


Схема управления лучом электронно-лучевой трубки

Its action is based on the creation of a directed electron flux and electrostatic control of this flux.

An elementary cathode-ray tube consists of an evacuated glass enclosure in which there is an indirectly heated cathode K for the thermionic emission of electrons; a grid M to control the electron stream; an accelerating anode A_1 to race up the electrons; a focusing electrode A_2 to form the electrons into a suitably focused beam; a high-voltage anode A_3 for further acceleration of the electrons; two sets of deflecting plates

DP_X and DP_Y , one for horizontal and one for vertical deflection of the beam in proportion to the respective voltages on the plates; and a luminescent screen S, located on the inner surface of the bulb. Electrodes constitute an electron gun, which creates the electron beam and directs it towards the viewing screen. Bombardment of the screen by the beam gives rise to both fluorescence (emission of light during bombardment) and phosphorescence (emission of light after bombardment). Variation of the bias voltage on grid M and of the accelerating voltage on anode A_1 regulates the size and intensity of the light spot.

A figure also shows the simplified circuit to control the initial beam adjustment along the axis Y (control along the axis X is similar)

Упрощенная функциональная схема осциллографа включает в себя: электронно-лучевую трубку (ЭЛТ); входной делитель напряжения (ВД); усилитель вертикального отклонения (УВО), состоящий из предварительного усилителя (ПУ), линии задержки (ЛЗ) и выходного усилителя (ВУ); блок синхронизации (БС); генератор развертки (ГР); усилитель горизонтального отклонения (УГО) и калибраторы амплитуды (КА) и длительности (КД).

Исследуемое напряжение обычно подается на вертикально отклоняющие пластины. Для наблюдения этого сигнала напряжения в функции времени, на горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение, как показано на рисунке.

Принцип развертки изображения иллюстрируется на рисунке, где даны кривые изменения напряжения u_x и u_y , которые подаются на пластины, и получающееся при этом изображение на экране осциллографа. Из рисунка видно, что при равенстве периодов напряжений u_x и u_y на экране получается неподвижное изображение одного периода исследуемого сигнала. При увеличении периода пилообразного напряжения u_x в n раз на экране получится n периодов исследуемого сигнала.

Для стабилизации изображения на экране осциллографа используется блок синхронизации, вырабатывающий сигнал развертки с изменяющейся частотой (в некоторых пределах) в соответствии с частотой исследуемого сигнала.

Если частота развертки кратна частоте периодического напряжения, поданного на вертикальные пластины, на экране появится неподвижная волна этого напряжения.

A simplified functional diagram of an oscilloscope includes: a cathode-ray tube (CRT); an input voltage divider (VD); Y- amplifier (YA) consisting of a prime amplifier (PA), a lag line (LL) and an output amplifier (OU); a synchronizer (S); a sweep generator (SG); an X-amplifier (XA) and calibrators of amplitude (CA) and of duration (CD).

The voltage under study is normally supplied to the vertical deflection plates. To observe this voltage as a function of time a saw-tooth voltage

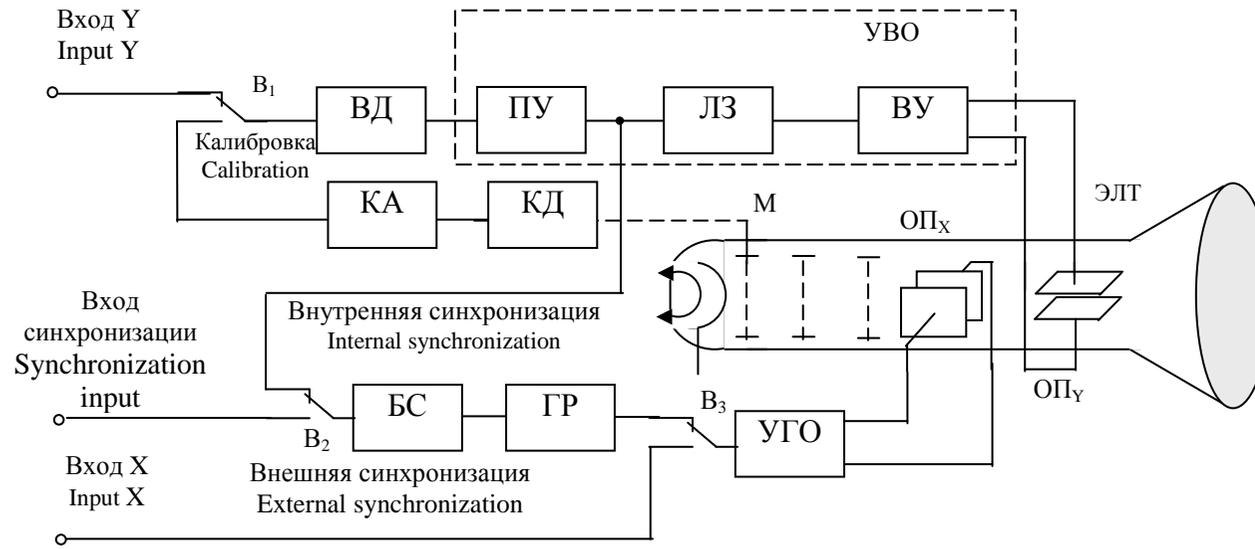
wave is supplied to the horizontal plates like it is shown in the figure.

Sweeping principle is illustrated in the figure where there are curves of time variation of voltages u_x and u_y , which are supplied to the plates, and the picture appeared on the oscilloscope screen. It is visible that when the periods of voltages u_x and u_y are equal a static picture of one period

of the signal under study is obtained on the screen. When a saw-tooth voltage u_x period increases by n times, on the screen there will be n periods of the signal under study.

To stabilize the oscilloscope screen picture a synchronizer is applied, it generates sweep waveform a variable frequency (within some bounds) in accordance with the frequency of the signal under study.

If the sweep frequency is an integral multiple or submultiple of a periodic voltage frequency on the vertical plates, the stationary voltage wave will appear on the screen.



Функциональная схема электронно-лучевого осциллографа
Functional diagram of cathode-ray oscilloscope

Генератор развертки обычно встроен в осциллограф. В осциллографах также предусматривается возможность запуска ГР от внешнего источника (внешняя синхронизация). Для этого используется специальный вход «Вход синхронизации» и переключатель B_2 .

При исследовании непериодических сигналов или одиночных импульсов используется ждущий режим работы генератора, при котором ГР вырабатывает пилообразный сигнал только с приходом исследуемого импульса.

При измерении амплитудных и временных параметров исследуемых сигналов измеряют соответствующие геометрические размеры изображений этих сигналов на экране и с помощью коэффициентов отклонения и коэффициентов развертки, характеризующих чувствительность каналов, определяют значения этих параметров. Для повышения точности измерений осциллографы имеют калибраторы амплитуды КА и длительности КД, позволяющие контролировать и устанавливать номинальные значения коэффициентов отклонения и коэффициентов развертки. Калибраторы представляют собой генераторы прямоугольных импульсов с известными значениями амплитуды и частоты. Для проверки коэффициентов отклонения переключатель B_1 устанавливается в положение «Калибровка».

Основные характеристики осциллографов

Коэффициент отклонения m_U - отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча (в делениях), которое вызвано этим напряжением. Обычно находится в 50 мкВ/дел – 10 В/дел. Коэффициент отклонения - параметр обратный чувствительности S_U осциллографа к напряжению: $S_U = 1/m_U$.

The sweep generator is commonly built into the oscilloscope. In oscilloscopes it is possible to start up a sweep generator (SG) from an external source (external synchronization). The special input «Sync. input» and switch B_2 are used for this.

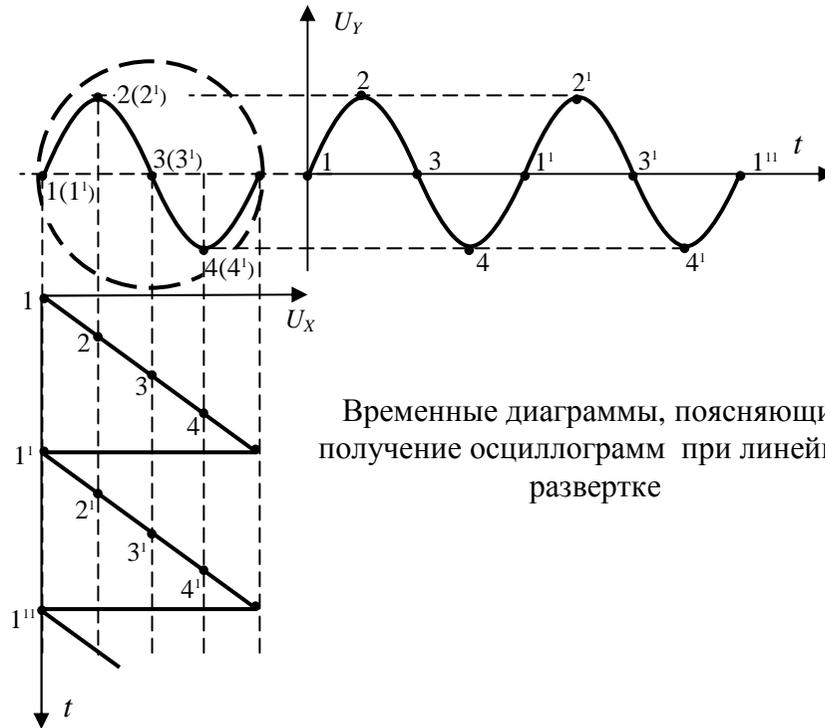
To study nonperiodic signal or single pulses the waiting mode of sweep generator is used. In this case a sweep generator produces a saw-tooth signal only when the signal under study appears.

When measuring amplitude and time parameters of signals under study, are fulfilled using the respective geometrical dimensions of signal display on the screen are measured and by means of deflection coefficients and sweep coefficients characterizing the channel sensitivity, values of these parameters are determined. To raise the accuracy of measurement, oscilloscopes are provided with calibrators of amplitude CA and of duration CD, which permit to control and to set the rating value of deflection

coefficients and sweep coefficients. A calibrator represents a generator of square-wave impulses with known values of amplitude and frequency. To test deflection factors the switch B_1 is set into the position “Calibration”.

General properties of oscilloscopes

Deflection factor m_U is the ratio of input signal voltage to a beam deflection (in divisions) caused by this voltage. Usually it is within the bounds 50 $\mu\text{V}/\text{div}$ – 10 V/div . The deflection factor is a parameter reverse to the voltage sensitivity of an oscilloscope: $S_U = 1/m_U$.



Временные диаграммы, поясняющие получение осциллограмм при линейной развертке

Полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения изменяется не более, чем на 30% относительно его значения при средней частоте. Обычно для низкочастотных осциллографов до 5 МГц, а для высокочастотных – до сотен мегагерц.

Коэффициент развертки - m_t - отношение времени Δt к отклонению луча, вызванному напряжением развертки за это время.

Обычно коэффициент развертки находится в диапазоне от 0,01 мкс/дел до 0,05 с/дел. Коэффициент развертки – параметр обратный скорости перемещения луча по оси X. Основная погрешность измерения напряжения и основная погрешность измерения временных интервалов определяются максимально допускаемыми погрешностями измерений соответствующих параметров при подаче на вход осциллографа стандартного сигнала синусоидальной или прямоугольной формы.

Параметры входов осциллографа определяются входным активным сопротивлением $R_{вх}$ и входной емкостью $C_{вх}$.

Обычно $R_{вх} > 1$ Мом, $C_{вх}$ – составляет единицы пикофарад.

Осциллографы также характеризуются другими параметрами, например: максимально допустимым входным напряжением, размерами рабочей части экрана, потребляемой мощностью, габаритами, массой и др.

Pass band is a frequency band within the bounds of which the deflection factor varies not more than by 30% relatively its value at medium frequency. For low-frequency oscillographs it usually comes up to 5 MHz, and for high-frequency ones – up to hundreds megahertz.

Sweep coefficient - m_t is the ratio of time Δt to beam deflection caused by sweep voltage during this time. The sweep coefficient is usually within the bounds of 0,01 μ s/div and 0,05 s/div. The sweep coefficient is the parameter reverse to beam traverse speed along the axis X. The basic error of voltage measurement and basic error of time interval measurements are determined by maximum allowable errors when measuring corresponding parameters of a standard sinusoidal or square signal which is supplied to the oscillograph input.

Input parameters of an oscillograph are determined by input resistance $R_{вх}$ and input capacitance $C_{вх}$. Usually $R_{вх} > 1$ Mohm, and $C_{вх}$ is only some picofarads.

Oscillographs are also characterized by other parameters. For example: maximum allowable input voltage, sizes of useful screen, power requirement, external dimensions, mass etc.

ДЛЯ ОЗНАКОМЛЕНИЯ

The principal advantages of cathode-ray oscillographs are the very high frequency limit and the fact that they draw substantially no power from the circuit. Their chief limitation is that only one quantity (or two quantities if a special electronic is used) can be observed or recorded at a time. Dimensional limitations of the screen may be an additional disadvantage in some cases. For the visual study of cyclic or recurrent phenomena, they are the preferred type because of simplicity of operation and lower cost. Cathode-ray tubes can be obtained with screens producing sufficiently brilliant traces for photographing transients. For long-time or high-speed transients, a high-speed shutterless moving-film camera can be used in conjunction with the oscillograph.

The simplicity and portability of modern oscillographs have made them invaluable tools for the observation and recording of transient and cyclic phenomena in all branches of engineering. In fact, one of the important advantages of electrical measuring methods lies in the ability of oscillographs faithfully to record extremely rapid transients and to enable investigators of cyclic phenomena immediately to observe the effects of various changes on the cycle. Two distinct classes of oscillographs may be recognized: the electromagnetic type and the cathode-ray oscillograph.

Electromagnetic oscillographs operate on the principle of the D'Arsonval movement. The moving coil consists of a single loop of small wire (for this reason these oscillographs are sometimes referred to as the bifilar type) to which is cemented a tiny mirror. This loop is suspended in the field of a permanent magnet and is immersed in oil to make the movement deadbeat.

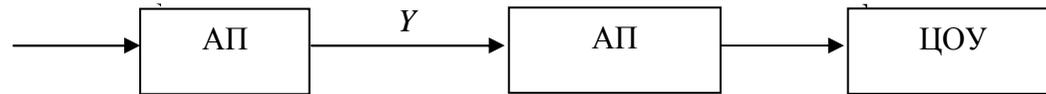
The inertia of the moving element is sufficiently small so that its deflection will be proportional to the instantaneous current through the loop as long as the frequency of the current is not too high. By means of the tiny mirror, motion of the element deflects a light beam along one axis; for viewing purposes, the light beam is deflected along the 90° axis by rotating or oscillating mirrors and is thrown on a viewing screen. Constant speed of rotation or oscillation of the mirror produces a linear time axis. For photographic recording, the viewing screen is replaced by a camera or the rotating mirror is replaced by a rotating drum to which a film or sensitive paper is fastened.

The principal limitation of electromagnetic oscillographs is their upper frequency limit – about 5000 cps – imposed by the inertia of the elements. This limit means that the oscillograph will not faithfully record high-frequency phenomena or very rapid transients with steep wave fronts. When this limitation is not controlling, electromagnetic oscillographs possess some desirable features. Standard models can be constructed so that long-time transients can be recorded on a time scale covering many feet of sensitive paper. For obtaining transients in which the frequency limit is not exceeded and in circuits in which the power drawn by the oscillograph is a negligible factor, the electromagnetic oscillograph is frequently the preferred type.

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (ЦИП)

ЦИП - это приборы, которые в процессе измерения автоматически вырабатывают дискретные сигналы о измерительной информации и представляют показания в цифровой форме. Функциональная схема цифрового прибора представлена на рисунке.

АП - аналоговый преобразователь, который преобразует входной аналоговый сигнал к виду удобному для дальнейшего преобразования.



АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

ЦОУ - цифровое отсчетное устройство, преобразующее кодированную информацию об измеряемой величине в цифровой отсчет удобный для считывания (сегментная светодиодная или жидкокристаллическая матрица или газоразрядные знаковые индикаторы).

Основным узлом цифрового прибора является *АЦП*, который производит дискретизацию, квантование и кодирование непрерывно измеряемой величины (путем преобразования аналоговой величины в цифровой код).

Дискретизация непрерывной во времени величины $Y(t)$ – это преобразование этой величины в прерывистую с соответствующими значениями $Y(t_k)$ в определенные моменты времени t_k . Промежуток времени между двумя соседними отсчетами называется шагом дискретизации - $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

Квантование заключается в замене непрерывных значений $Y(t)$ конечным набором ее дискретных значений $Y_k(t)$. Разность между ближайшими уровнями квантованной величины называется шагом квантования.

Кодированием называется процесс представления численного значения величины определенной последовательностью цифр или сигналов.

По способу преобразования непрерывной величины в квантованную выделяют три основных метода.

DIGITAL MEASURING DEVICES (DMD)

DMD – is a device, which during measurement produces automatically digital signals about measurement information and represents indication in a digital form. Its functional scheme is presented in the figure.

AT – analog transducer, which transforms input analog signal into the form suitable for subsequent transformation.

ADC – analog-to-digital coder.

DMI – digital measuring indicator transforming the coded information about measured quantity into digital indication suitable for reading (segment light-emitting diode matrix or liquid-crystal indicator or gas-discharge indicator).

The main unit of a digital device is an analog-to-digital coder, which makes digitization, quantization and encoding of continuously measured quantity (by means of transformation of analog quantity into numerical code).

Digitization of a continuous quantity $Y(t)$ – is transformation of this quantity into discontinuous one with corresponding values $Y(t_k)$ in the definite time moments t_k . The time interval between two neighbouring readings is called a digitization step - $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

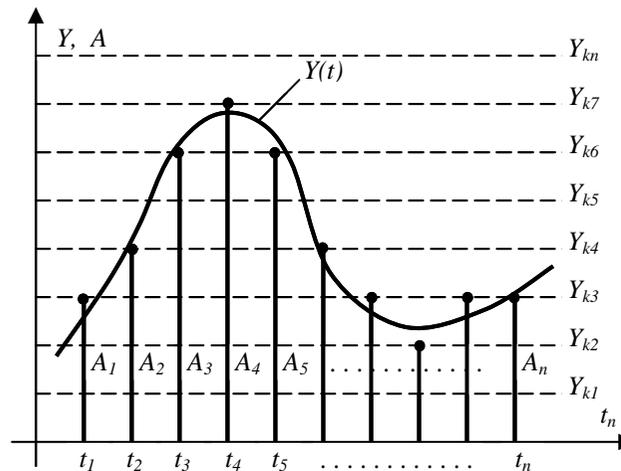
Quantization lies in substitution of continuous values of $Y(t)$ for finitesimal set of its digital values $Y_k(t)$. The difference between immediate levels of quantized value is called quantization step.

Encoding is a presentation process of numerical value of quantity by the definite sequence of figures or signals.

By manner of transformation of continuous quantity into quantized one there are three basic procedures.

Метод последовательного счета.

При этом методе происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины Y с известной квантованной величиной Y_k , которая изменяется во времени (увеличивается или уменьшается) скачками в соответствии с шагом квантования. Число шагов, при котором наступает равенство $Y_k(t_u)=Y$, равно номеру отождествляемого уровня квантования. На основе этого метода построена работа приборов с времяимпульсным и частотно-импульсным преобразованием. В таких приборах измеряемая величина сначала преобразуется в числоимпульсный код, который затем преобразуется в другие коды удобные для управления отсчетным устройством. Приборы отличаются несложным исполнением, но имеют низкое быстродействие.



Квантование по уровню и дискретизация по времени непрерывно измеряемой величины
Amplitude and time quantization of continuously measured quantity

Метод последовательного приближения.

При этом методе происходит последовательное во времени сравнение измеряемой величины Y с известной квантованной величиной Y_k , которая изменяется во времени скачками по заданному алгоритму. Значение известной величины, при котором наступает равенство $Y_k(t_u)=Y$, равно номеру отождествляемого уровня.

На основе этого метода работают приборы с поразрядным уравниванием и кодово-импульсные приборы. Это более сложные и дорогие приборы, с более высоким быстродействием.

Метод считывания.

При этом методе происходит одновременное сравнение измеряемой величины Y с известными величинами $Y_{k1}, Y_{k2}, Y_{k3}, \dots, Y_{ki}$, значения которых равны уровням квантования. Известная величина, равная измеряемой $Y_{ki}=Y$, дает номер отождествляемого уровня квантования. Приборы этого типа имеют самое высокое быстродействие, однако они имеют сложную и громоздкую схему построения и высокую стоимость.

Incremental method.

According to this method the measured quantity Y is compared sequentially in time with known quantized value Y_k , which varies in time (increases or decreases) in discrete steps in accordance with the quantization step. Number of steps to achieve the equality $Y_k(t_u)=Y$ is equal to number of identifiable quantization level. The operation of devices with pulse-time and pulse-frequency transformation is based on this method. In such devices measured quantity at first is transformed into unit-counting code, which then is transformed into other codes suitable to control the measuring indicator. These devices are notable for simple construction but they have slow response speed.

Step-by-step approach method.

In this method there is sequential in time comparison of the measured quantity Y with the known quantized value Y_k , which varies in time in discrete steps according to the specified algorithm. Known quantity value guaranteeing equality $Y_k(t_u)=Y$ is equal to the number of the identifiable level.

Devices with digit-to-digit balancing and pulse-code devices operate on the basis of this method. These are more complex and expensive devices with higher response.

Reading method.

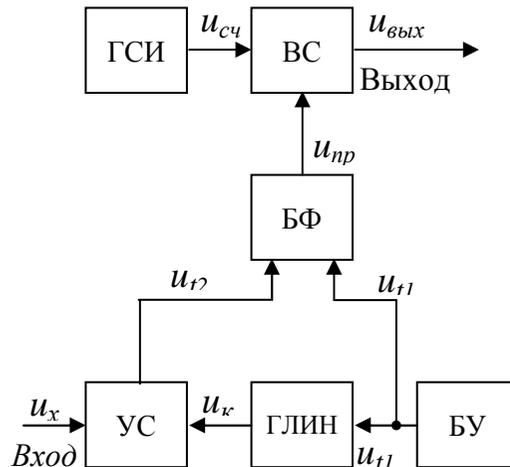
Here there is simultaneous comparison of the measured quantity Y with the known quantities $Y_{k1}, Y_{k2}, Y_{k3}, \dots, Y_{ki}$, whose values are equal to quantization level. The known quantity, equal to measured one $Y_{ki}=Y$, indicates the number of an identifiable quantization level. Devices of such type have the highest response but they have complicated and cumbersome construction scheme and high cost.

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СЧЕТА

ЦИП с непосредственным преобразованием в код временных интервалов (временяимпульсные)

В основу времяимпульсного метода положено преобразование измеряемой величины в интервалы времени, которые затем заполняются импульсами стабильной частоты. В качестве примера рассмотрим структурную схему и временные диаграммы (представлены на рисунке) времяимпульсного АЦП, использующегося в цифровых вольтметрах постоянного тока, который преобразует постоянное напряжение в цифровой код. АЦП содержит блок управления БУ, который импульсом u_{t1} запускает блок формирования БФ и генератор линейно изменяющегося напряжения ГЛИН.

Это приводит к тому, что временной селектор ВС начинает пропускать на выход счетные импульсы, вырабатываемые генератором счетных импульсов ГСИ. Линейно изменяющееся напряжение u_k подается на устройство сравнения УС, которое вырабатывает импульс u_{t2} в момент, когда u_k становится равным входному (измеряемому) напряжению u_x , постоянно поступающему на УС. Импульс u_{t2} приводит к закрытию временного селектора и к прекращению прохождения счетных импульсов на выход. Число импульсов, заполняющих временной интервал $t_2 - t_1$ определяется формулой $N = (t_2 - t_1) / T_{cч}$. Поскольку $t_2 - t_1 = u_x / k$, где k – известный коэффициент, зависящий от скорости нарастания напряжения u_k , то $N = u_x / (k \cdot T_{cч}) = u_x \cdot f_{cч} / k$.

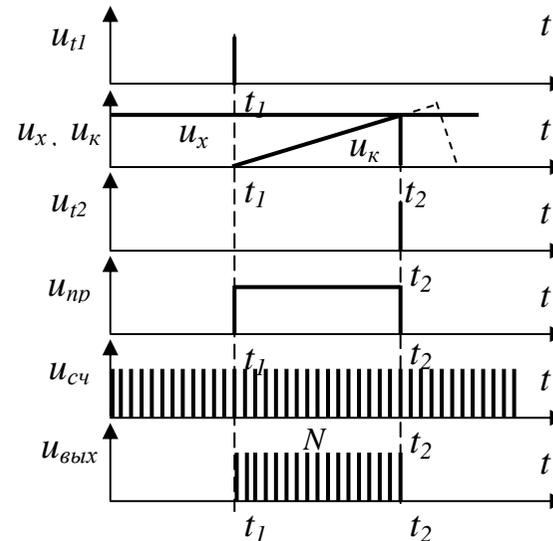


Блок-схема и временные диаграммы времяимпульсного АЦП

DIGITAL MEASURING DEVICES OF SEQUENTIAL COUNTING

DMD with direct transformation of time intervals into code (pulse-time)

The pulse-time method is based on transformation of a measured quantity into intervals, which then are filled up with impulses of stable frequency. As an illustration let's examine a block diagram and time pictures (presented in the figure) of a pulse-time analog-to-digital coder applied in a digital DC-voltmeter, which transforms direct voltage into a numerical code. Analog-to-digital coder contains a control unit CU, which starts up the formation unit FU by impulse u_{t1} , and a ramp generator RG.



It leads to that a time selector TS begins skipping the pulses, produced by the generator of the counting impulses GCI. The ramp voltage u_k is delivered to the comparison device CD, which produces an impulse u_{t2} in that moment when u_k becomes equal to the input (measured) voltage u_x , permanently delivered to CD. Impulse u_{t2} causes the time selector to close and to stop counting impulses propagation.

The number of impulses filling up the time interval $t_2 - t_1$ is determined from the formula $N = (t_2 - t_1) / T_{cч}$.

As $t_2 - t_1 = u_x / k$, where k – a known factor depending on rate of voltage rise u_k , then $N = u_x / (k \cdot T_{cч}) = u_x \cdot f_{cч} / k$.

Составляющие погрешности прибора:

- 1) погрешность квантования, зависящая от $\Delta t_x / T_{c\kappa}$ (вследствие не кратности величин);
- 2) погрешность от нестабильности частоты счетных импульсов $f_{c\kappa}$;
- 3) погрешность от нелинейности и нестабильности наклона кривой линейно изменяющегося напряжения и смещения нуля;
- 4) из-за наличия порога срабатывания УС;
- 5) из-за наличия шумовых помех.

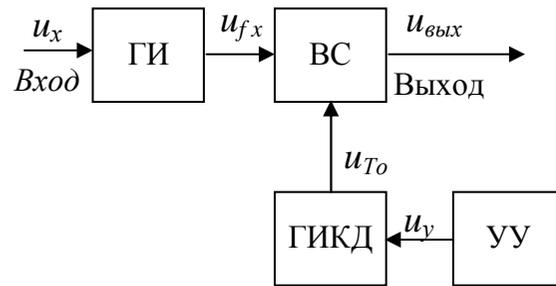
Общая приведенная погрешность АЦП данного типа лежит в пределах 0,05% - 0,1%.

ЦИП с непосредственным преобразованием в код частоты (частотно-импульсные)

В частотно-импульсных АЦП входная аналоговая величина (напряжение u_x) предварительно преобразуется в частоту следования импульсов f_x . На выходе цифровой код формируется посредством заполнения этими импульсами временного интервала строго определенной длительности T_o . Структурная схема и временные диаграммы АЦП данного типа представлены на рисунке.

Входное напряжение u_x поступает на генератор импульсов ГИ с частотой следования, управляемой входным напряжением $f_x = k \cdot u_x$, где k - коэффициент преобразования. Устройство управления запускает генератор импульсов калиброванной длительности ГИКД, который управляет временным селектором ВС, открывая его на время T_o . Число кодовых импульсов поступающих на выход определяется по формуле следующим образом:

$$N = T_o / T = T_o f_x.$$



Блок-схема и временные диаграммы частотно-импульсного АЦП

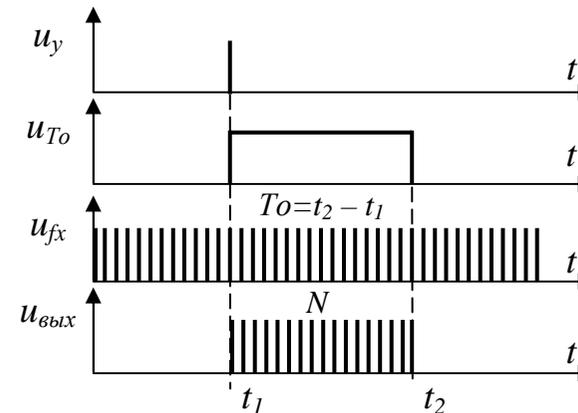
Instrumental error components:

- 1) quantizing error depending on $\Delta t_x / T_{c\kappa}$ (owing to quantity non-multiplicity);
- 2) error because of frequency instability of counting impulses f_c ;
- 3) error owing to non-linearity and instability of the curve slope of ramp voltage and zero shift;
- 4) error because of DC operating level presence.
- 5) error because of noise interference presence.

The total reduced error of an analog-to-digital coder of the given type lies within the bounds 0,05% - 0,1%.

DMD with direct transformation into the frequency code (pulse-frequency)

In a pulse-frequency analog-to-digital coder the input analog quantity (voltage u_x) is previously transformed into a pulse repetition frequency f_x . At the output the numerical code is formed by means of filling up the



interval of the definite duration T_o with these impulses. The block diagram and time pictures of analog-to-digital coder of the examined type are presented in the figure.

Input voltage u_x is applied to the impulse generator IG with the frequency controlled by input voltage $f_x = k \cdot u_x$, where k - a conversion factor. The control device

starts up the generator of impulses with calibrated duration GICD, which controls the time selector TC, opening it for the time interval T_o . The number of code pulses going to the output is determined as follows:

$$N = T_o / T = T_o f_x.$$

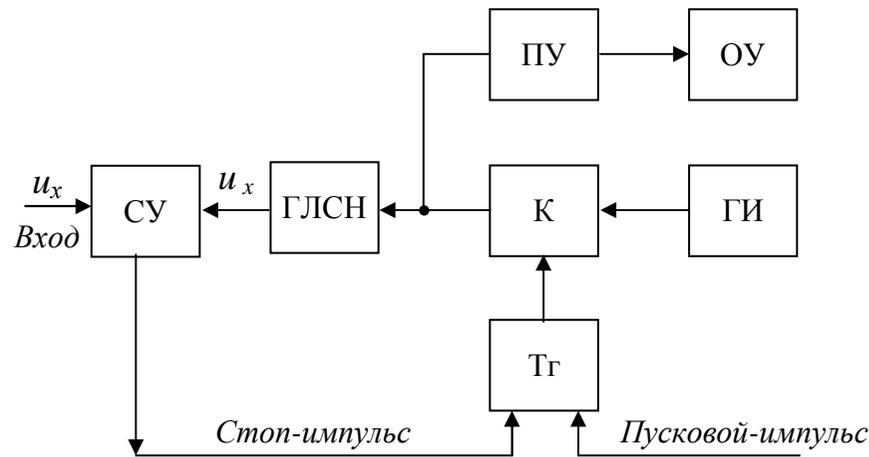
Аналогичным образом работают и приборы для измерения частоты (частотомеры), принцип действия которых заключается в подсчете импульсов f_x за интервал T_o .

Недостаток приборов с частотно-импульсным АЦП заключается в их сравнительной сложности. В настоящее время погрешность приборов этого типа (в основном от нестабильности коэффициента преобразования k) может быть снижена до 0,01% (приведенная погрешность).

ЦИП С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В КОД НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В этих приборах измеряемое напряжение u_x сначала преобразуется в числоимпульсный код путем сравнения u_x с известным напряжением u_k . Это напряжение u_k возрастает во времени скачками. Причем каждый скачок соответствует шагу квантования. Числоимпульсный код будет равен числу ступеней, при котором наступает равенство $u_k = u_x$.

Структурная схема и диаграмма напряжений такого прибора представлены на рисунке.



Блок-схема и диаграмма напряжений ЦИП с непосредственным преобразованием в код напряжения

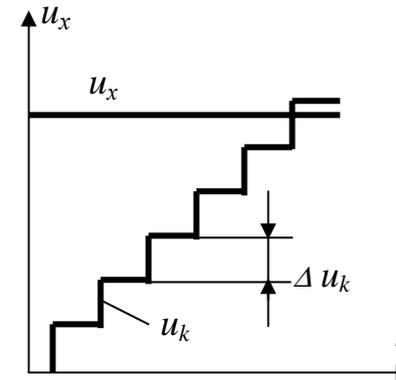
При подаче пускового импульса триггер Тг опрокидывается и своим выходным сигналом открывает ключ К.

The devices for frequency measurement (frequency meters) work the same their operation is based on calculation of impulses f_x during the interval T_o .

The disadvantage of devices with a pulse-frequency analog-to-digital coder is their comparative complexity. At the present time an error of this type of devices (mainly because of instability of a conversion factor k) can be reduced to 0,01% (a reduced error).

DMD WITH DIRECT TRANSFORMATION OF DIRECT VOLTAGE INTO A CODE

In the devices of this type the measured voltage u_x is transformed at first into a unit-counting code by means of comparison u_x with the known voltage u_k . This voltage u_k increases in time in discrete steps. Moreover each jump corresponds to a quantization step. A unit-counting code is equal to the number of steps, when the values of u_k and u_x become equal to each other.



A block diagram and a voltage time picture of such a device are presented in the figure.

When applying a triggering pulse the trigger Тг is upseted and opens (by its output signal) the switch К.

Импульсы от генератора импульсов ГИ через ключ начинают поступать на вход генератора линейно-ступенчатого напряжения ГЛСН и пересчетного устройства ПУ. Напряжение u_k на выходе ГЛСН начинает возрастать по линейно-ступенчатому закону. При $u_k = u_x$ сравнивающее устройство СУ выдает стоп-импульс, возвращающий триггер в исходное состояние. Таким образом, на отсчетном устройстве ОУ будет зафиксировано $N = u_k / \Delta u_k = u_x / \Delta u_k$.

Суммарная погрешность прибора определяется:

- погрешность дискретизации в момент равенства $u_k = u_x$, зависящая от числа ступеней Δu_k ;
- погрешность реализации, обусловленная неодинаковостью и нестабильностью ступеней Δu_k ;
- погрешность, обусловленная порогом чувствительности сравнивающего устройства.

В настоящее время такие приборы используются мало из-за низкого быстродействия.

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Цифровые приборы с кодово-импульсным АЦП (поразрядного уравнивания)

Принцип работы приборов такого типа рассмотрим на примере кодоимпульсного вольтметра, структурная схема и диаграмма напряжений, которого представлены на рисунке.

Пусковым импульсом триггер Тг опрокидывается и открывает ключ К.

Импульсы от генератора тактовых импульсов ГТИ начинают поступать на вход распределителя тактовых импульсов РТИ, который выдает импульс на своем первом выходе. Под действием этого импульса опрокидывается триггер ТГ₁. Триггер ТГ₁ воздействует на цифро-аналоговый преобразователь ЦАП, на выходе которого появляется напряжение $u_{k1} = 2^{n-1} \Delta u_k$, где Δu_k - напряжение, равное шагу квантования.

The impulses from the pulse generator PG via the switch begin to enter into the input of a linear-step voltage generator LSVG and a scaler S. The generator output voltage u_k begins to increase by the linear-step law. When $u_k = u_x$ a comparison device CD generates a stop-impulse, resetting the trigger. Thus, the measuring indicator MI records $N = u_k / \Delta u_k = u_x / \Delta u_k$.

The total error of a device includes:

- a digitizing error in the moment of equality $u_k = u_x$, depending on the number of steps of Δu_k ;
- a realization error caused by the inequality and instability of steps Δu_k ;
- error caused by the threshold sensitivity of a comparison device.

At present time such devices are applied not very often because of their slow response.

DIGITAL MEASURING DEVICES OF SUCCESSIVE APPROXIMATION

Digital devices with a pulse-code analog-to-digital coder (digit-to-digit balancing)

Let's take a code-impulse voltmeter as an example to consider the operation principle of such type devices. The block diagram and voltage time picture of a such device are presented in figure.

The triggering pulse upsets the trigger Tg and opens switch K.

The impulses from a clock pulses generator CPG begin to enter the input of a timing-pulse distributor TPD, which generates an impulse on its first output. Under the action of this impulse the trigger Tg₁ is upseted. The trigger Tg₁ acts upon a digital-to-analog converter DAC, on the output of which the voltage $u_{k1} = 2^{n-1} \Delta u_k$ appears; here Δu_k - voltage equal to a quantization step.

Если $u_{k1} > u_x$, то сравнивающее устройство СУ выдает сигнал открывающий ключи $K_1 - K_n$. При следующем шаге (задается ГТИ) распределителя РТИ появляется импульс на его втором выходе. Этот импульс через ключ K_1 возвращает триггер ТГ₁ в исходное состояние, отключая первую ступень напряжения u_{k1} , и опрокидывает триггер ТГ₂. Триггер ТГ₂ воздействует на ЦАП, на выходе которого появляется следующая ступень $u_{k2} = 2^{n-2} \Delta u_k$. Если $u_{k2} < u_x$, то ключи $K_1 - K_n$ будут закрыты и при следующем шаге РТИ импульс с третьего выхода не сможет вернуть триггер ТГ₂ в исходное состояние, но опрокинет триггер ТГ₃, включающий следующую ступень напряжения u_k . После этого шага на выходе ЦАП будет напряжение $U_{k2} = 2^{n-2} \Delta U_k + 2^{n-3} \Delta U_k$, которое будет сравниваться с U_x и т.д. Таким образом, к концу цикла измерения на выходе ЦАП будет набрано напряжение U_k , наиболее близкое значению U_x . Этому значению U_k будет соответствовать определенная комбинация опрокинутых триггеров. Выходные потенциалы этих триггеров образуют код. При $(n+2)$ -м шаге импульс распределителя возвращает триггер ТГ в исходное состояние, и на этом цикл преобразования заканчивается. На рисунке показана диаграмма напряжений, иллюстрирующая образование U_k и двоичного параллельного кода 01001 при измерении U_x .

Основные составляющие погрешности:

- погрешность дискретизации, определяется числом разрядов кода;
- погрешность реализации, зависящая от ЦАП;
- погрешность от наличия порога чувствительности СУ.

У этих приборов достигнута высокая точность (погрешность 0,001%) и может быть получено высокое быстродействие.

If $u_{k1} > u_x$ then a comparison device CD generates the signal to open switches $K_1 - K_n$. During next step of a distributor TPD (given by CPG) the impulse appears on its second output. This impulse resets the trigger Tg₁ via the switch K_1 , cutting out the first step of voltage u_{k1} , and upsets the trigger Tg₂. The trigger Tg₂ acts upon DAC, on the output of which the following step $u_{k2} = 2^{n-2} \Delta u_k$ appears. If $u_{k2} < u_x$, then switches $K_1 - K_n$ will be closed and during the next step of TPD the impulse from the third output will not reset the trigger Tg₂, but it upsets the trigger Tg₃, switching on the next voltage step u_k . After this step on the output of DAC there will be the voltage $U_{k2} = 2^{n-2} \Delta U_k + 2^{n-3} \Delta U_k$, and it will be compared with U_x and so on. Thus, towards the end of the measurement cycle on the output of DAC there will be the voltage U_k , which is the closest to value U_x . The definite combination of triggers will corresponds to this value U_k . Output potentials of these triggers form a code. At $(n+2)$ -th step the distributor impulse resets trigger Tg and the transformation cycle comes to the end.

In the figure shown is the voltage diagram illustrating the formation of U_k and binary code 01001 at measurement of U_x .

Basic error components:

- digitizing error determined by the number of code positions;
- realization error depending on DAC;
- error because of presence of threshold sensitivity of CD.

These devices have high accuracy (error is 0,001%) and it's possible to obtain fast response.

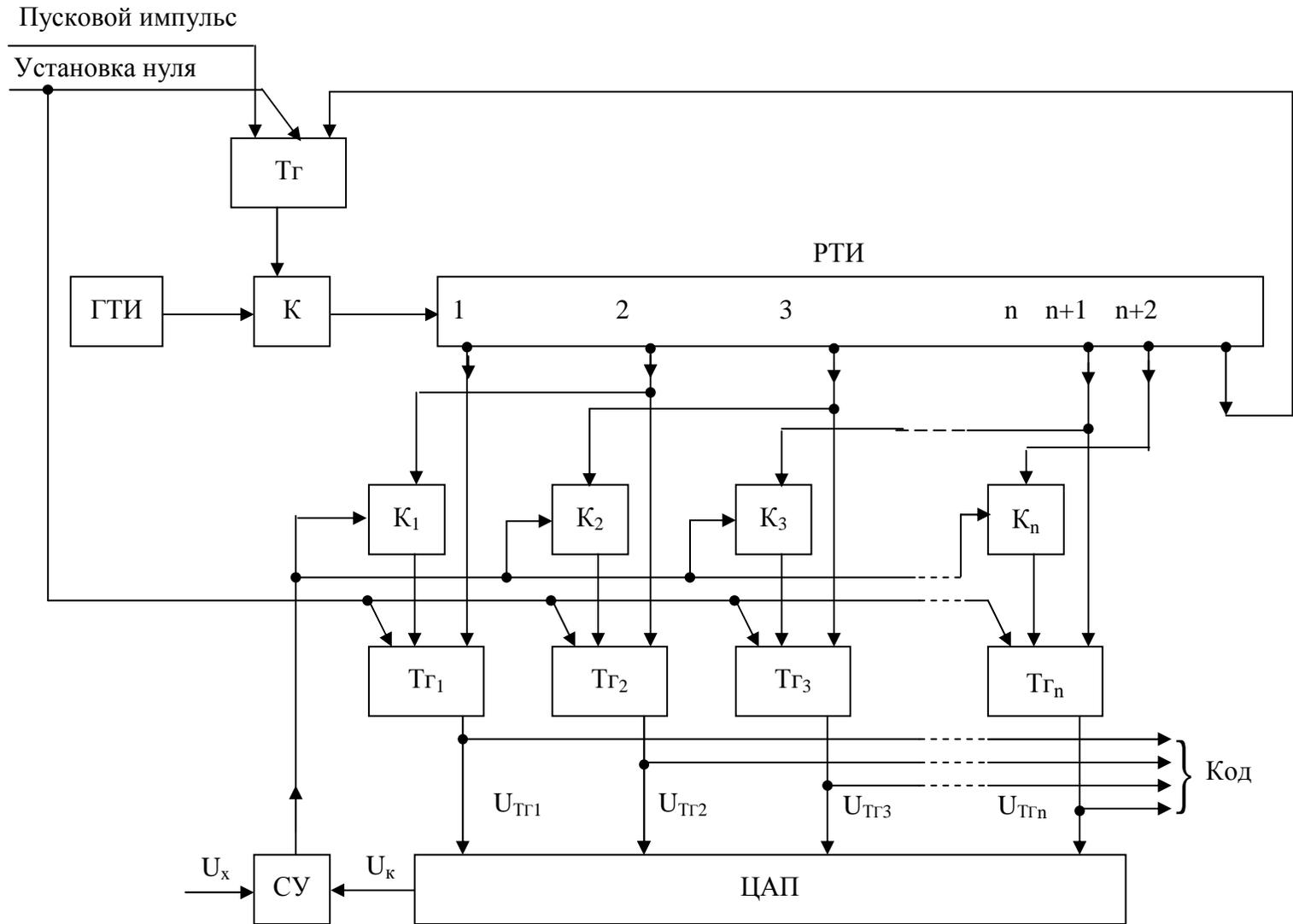


Схема кодово-импульсного АЦП

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ СЧИТЫВАНИЯ

Структурная схема ЦИП считывания представлена на рисунке, где ИН – источник известных напряжений, которые соответствуют уровням квантования; $СУ_1, СУ_2, СУ_3, \dots, СУ_n$ – сравнивающие устройства.; ПКК – преобразователь единичного кода в код управления отсчетным устройством ОУ.

Появление на входе прибора напряжения U_x вызывает срабатывание сравнивающих устройств, для которых $U_x > U_{ki}$. На выходе сработавших СУ появляются сигналы, соответствующие 1, на выходе остальных СУ – сигналы 0.

Измеренная величина одновременно сравнивается со всеми уровнями квантования.

Таким образом, на выходе сравнивающих устройств получается единичный код, определяемый размером U_x . Этот код преобразуется с помощью ПКК в другой вид кода, направляемый на ОУ и на выход.

Достоинство таких приборов – малое время преобразования (сверхвысокое быстродействие, практически мгновенное измерение 10^7 изм/с), определяемое срабатыванием СУ и ПКК. Недостаток их заключается в сложности аппаратуры (требуется N сравнивающих устройств и сложный источник известных напряжений).

DIGITAL MEASURING READING INSTRUMENTS

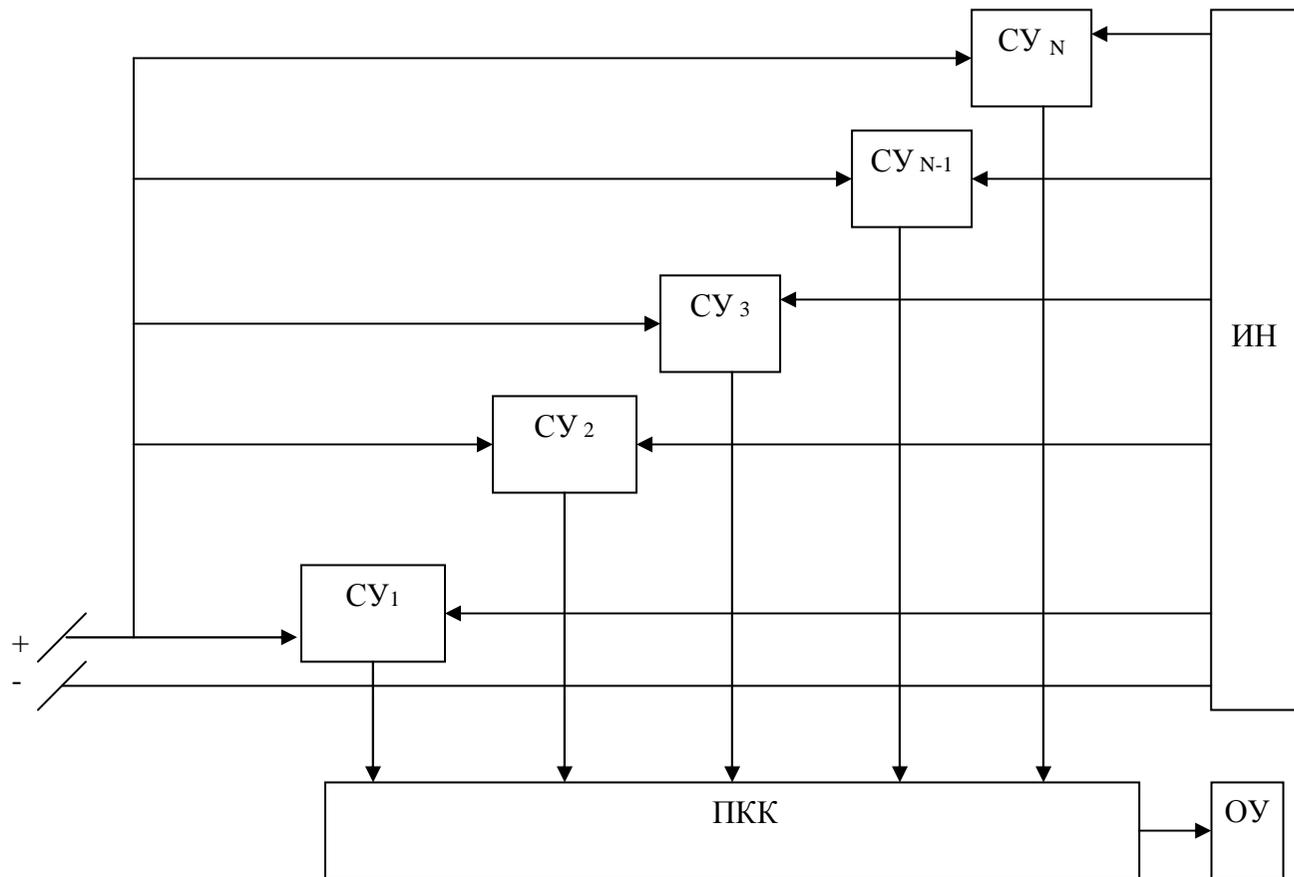
A block diagram of digital measuring reading instruments is presented in the figure, where SNV – source of known voltages corresponding to quantization levels; $CD_1, CD_2, CD_3, \dots, CD_n$ – comparison devices; CUC – converter of a unit code into a code of controlling measuring indicator MI.

Appearance of the voltage U_x on the device input causes the comparing devices for which $U_x > U_{ki}$ to function. Signals appear on the outputs of active comparing devices; these signals correspond to 1, and there are 0 signals on the outputs of other devices CD.

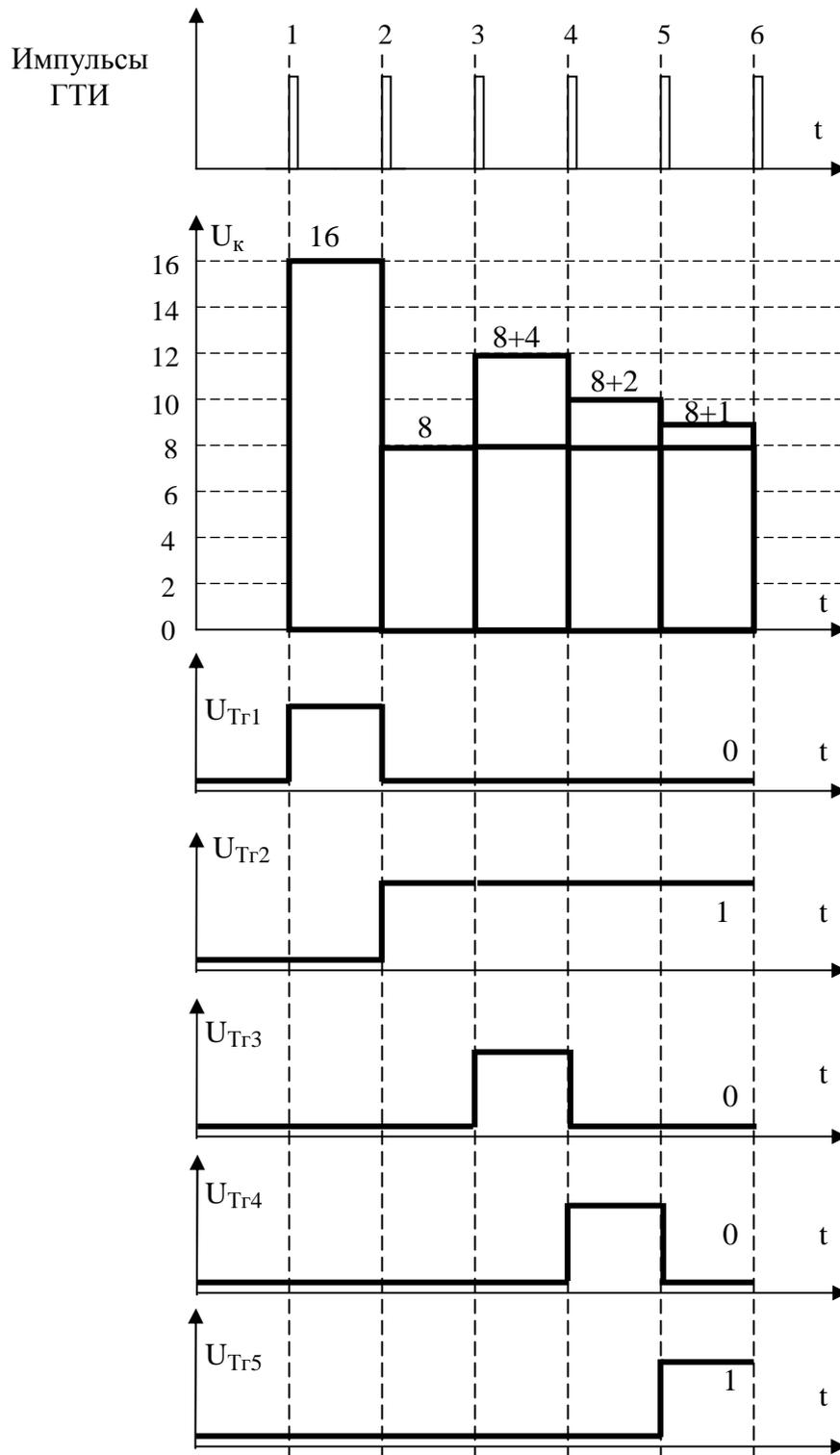
The measured quantity is simultaneously compared with all the quantization levels.

Thus, on the output of comparing devices there is the unit code defined by value of U_x . This code is transformed with aid of CUC into another code form and is sent to MI and to the output.

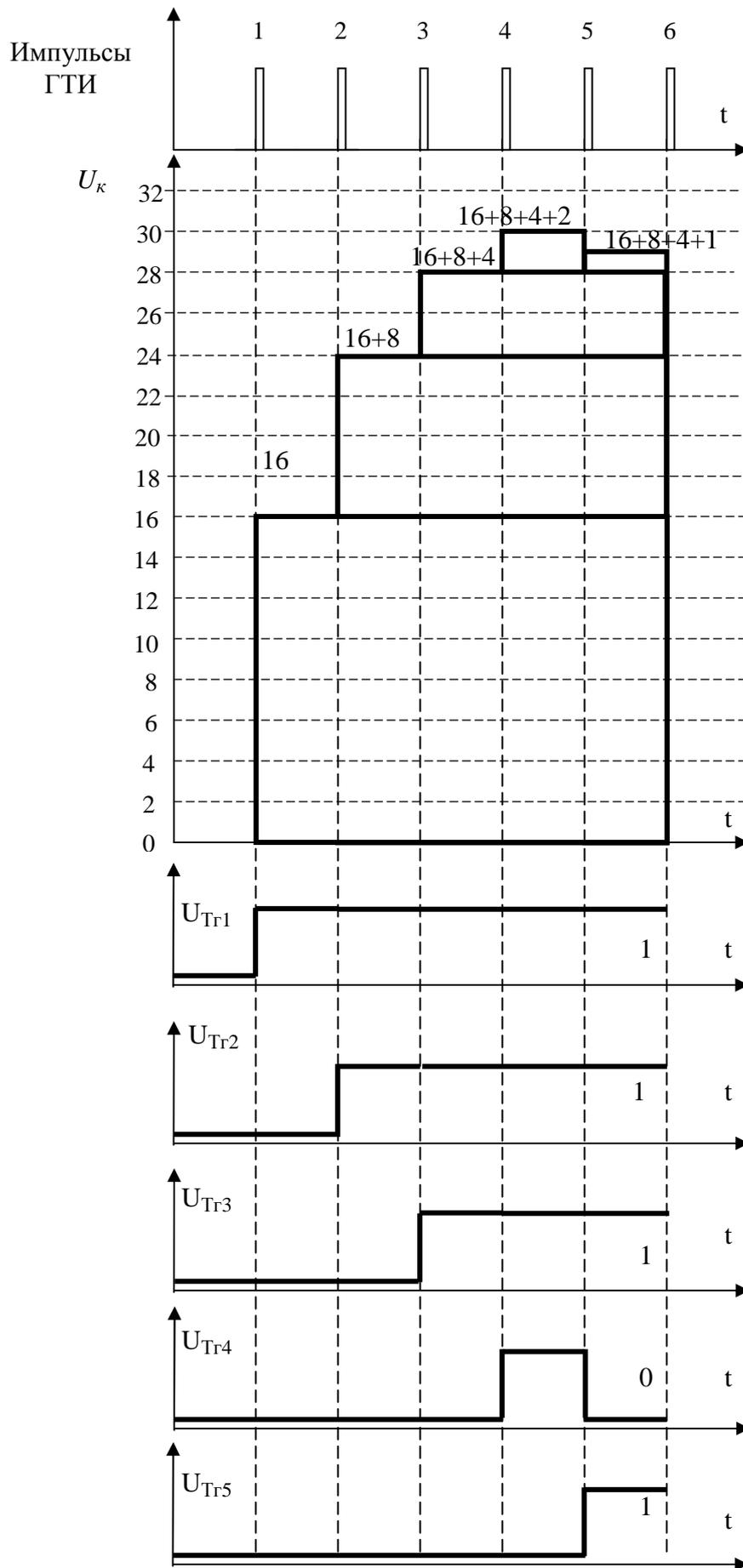
The advantage of such devices is – short transformation time (superhigh response speed, practically instant measurement: 10^7 meas/s), determined by the functioning of CD and CUC. Disadvantage is in the apparatus complexity (it is required to have N comparing devices and complicated source of known voltages).



ЦИУ считывания для измерения напряжения



Диаграммы напряжений, иллюстрирующие образование двоичного кода 01001 ($n = 5$ $U_x = 9$ В.)



Диаграммы напряжений, иллюстрирующие образование двоичного кода 11101 ($n = 5$ $U_x = 29$ В.)

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ И БОЛЬШИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Для выполнения различных измерительных преобразований используют масштабные измерительные преобразователи, к которым относятся: шунты, делители напряжения, измерительные усилители, измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Шунт представляет собой резистор, включаемый параллельно средству измерения, предназначен для уменьшения тока, протекающего по измерительному механизму в заданное число раз. Шунты, как правило, применяются в цепях постоянного тока в магнитоэлектрических приборах. Классы точности шунтов от 0,02 до 0,5.

Делитель напряжения служит для уменьшения напряжения в определенное число раз. Разновидность делителя напряжения – добавочное сопротивление, которое включается последовательно с вольтметром. Классы точности калиброванных добавочных резисторов от 0,01 до 1,0.

Измерительные усилители служат для усиления сигналов постоянного и переменного тока, т.е. для расширения пределов в сторону малых сигналов.

Измерительные трансформаторы напряжения и тока используют как преобразователи больших переменных токов и напряжений в относительно малые напряжения и токи, допустимые для измерения приборами с небольшими стандартными пределами измерения (например, 5 А, 100 В). Применение измерительных трансформаторов в высоковольтных цепях позволяет обеспечить безопасность работы обслуживающего персонала.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток: первичной с числом витков w_1 и вторичной - w_2 , помещенных на ферромагнитный сердечник.

В трансформаторах тока, как правило, первичный ток I_1 больше вторичного I_2 , поэтому $w_1 < w_2$. Первичная обмотка может состоять из нескольких витков, а в некоторых случаях из одного витка, в виде шины, проходящей через окно сердечника.

FEATURES OF HIGH AND LOW CURRENT AND VOLTAGE MEASUREMENT

Scale-measuring transducers, such as: shunts, potentiometers, measuring amplifiers, current and voltage measuring transformers are used to fulfill different measurement transformations.

A shunt is a resistor connected in parallel with a measuring instrument and it is intended to reduce the current flowing through the measuring mechanism by the set number of times. As a rule, shunts are applied in DC circuits in moving-coil instruments. Shunt accuracy rating is within the bounds of 0,02 and 0,5.

A potential divider (a potentiometer) serves to reduce the voltage by definite number of times. A series resistor (an auxiliary resistor) is a kind of potentiometer. Accuracy ratings of calibrated auxiliary resistors are within the bounds of 0,01 and 1,0.

Measuring amplifiers serves for DC and AC signal multiplication, i.e. to expand the measuring range in order to perceive small signals.

Voltage and current measuring transformers function as transducers of high alternating currents and voltages into relatively low currents and voltages, which can be measured by instruments with small standard measuring ranges (for instance, 5 A, 100 V). The application of measuring transformers in high-voltage circuits provides the industrial safety of operating staff.

Measuring transformers consist of two isolated coils: primary one with w_1 number of turns and secondary one with w_2 number of turns, which are situated on a ferromagnetic core.

In current transformers, as a rule, the primary current I_1 is greater than the secondary one I_2 , therefore $w_1 < w_2$. The primary coil may consist of several turns and in some cases of one turn in the form of a bus lead passing through the core window.

В трансформаторах напряжения первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , поэтому $w_1 > w_2$.

По схемам включения в измеряемую цепь и по условию работы трансформаторы напряжения и тока отличаются друг от друга.

Первичную обмотку трансформатора тока включают в измеряемую цепь последовательно, а трансформатора напряжения – параллельно. Измерительные приборы включают во вторичную обмотку трансформаторов.

По показаниям приборов определяют измеряемые величины напряжения и тока с помощью коэффициентов κ_I и κ_U .

$$\kappa_I = \frac{I_1}{I_2} \quad - \text{ действительный}$$

коэффициент трансформации для трансформаторов тока.

$$\kappa_U = \frac{U_1}{U_2} \quad - \text{ действительный}$$

коэффициент трансформации для трансформаторов напряжения.

Однако κ_I и κ_U непостоянны, а зависят от величин токов и напряжений, характера и значения нагрузки вторичной цепи, частоты тока, а также от конструкции трансформаторов. Поэтому для определения токов и напряжений по показаниям приборов используют не действительные, а номинальные коэффициенты трансформации:

$$I_1 = \kappa_{IH} I_2, \quad U_1 = \kappa_{UH} U_2,$$

$$\text{где: } \kappa_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad \kappa_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} \quad -$$

номинальные коэффициенты трансформации.

In voltage transformers the primary voltage U_1 is greater than the secondary one U_2 , therefore $w_1 > w_2$.

Current and voltage transformers differ from each other in terms of their connection with a measured circuit and their working conditions.

The primary winding of a current transformer is connected with a measured circuit in series and that one of a voltage transformer – in parallel. Measuring instruments are connected with the secondary transformer winding.

Measured values of voltage and current are determined on the basis of instrument readings with the help of factors κ_I and κ_U .

$$\kappa_I = \frac{I_1}{I_2} \quad - \text{ real transformation}$$

ratio for the current transformers.

$$\kappa_U = \frac{U_1}{U_2} \quad - \text{ real transformation}$$

ratio for the voltage transformers.

However, κ_I and κ_U are not constant, they depend on current and voltage values, character and value of the secondary circuit load, current frequency, as well as on a transformer construction. That is why to define currents and voltages from instrument readings we use not real but nominal transformer ratios:

$$I_1 = \kappa_{IH} I_2, \quad U_1 = \kappa_{UH} U_2,$$

$$\text{where } \kappa_{IH} = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}, \quad \kappa_{UH} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}}$$

- nominal transformer ratios.

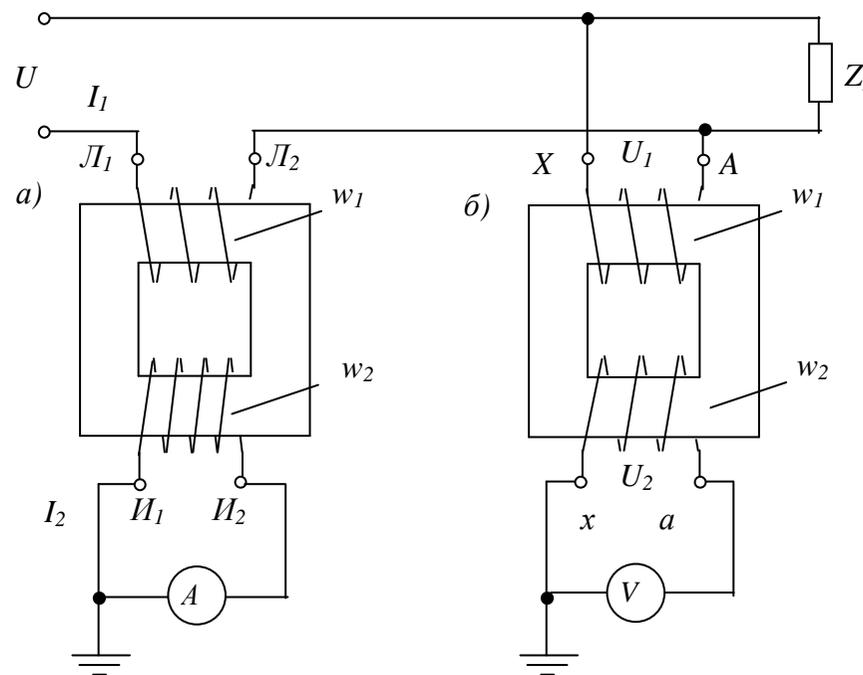


Схема включения измерительных трансформаторов тока а) и напряжения б)

Connection scheme of measuring current transformers a) and voltage ones б)

Определение измеряемых величин по номинальным коэффициентам трансформации приводит к погрешностям.

$$f_I = 100(\kappa_{IH} - \kappa_I) / \kappa_I - \text{токовая погрешность,}$$

$$f_U = 100(\kappa_{UH} - \kappa_U) / \kappa_U - \text{погрешность напряжения.}$$

У измерительных трансформаторов имеется еще и угловая погрешность, из-за неточности передачи фазы первичной величины вторичной величине. Угловая погрешность оказывает влияние на измерение величин некоторыми приборами (ваттметры, фазометры), показания которых зависят от фазового сдвига между токами в цепях этих приборов.

Как известно из теории, для трансформаторов тока в идеальном случае фазовый сдвиг между векторами вторичного I_2 и первичного I_1 токов составляет 180° . Такой же фазовый сдвиг должен быть между векторами вторичного U_2 и первичного U_1 напряжений для трансформаторов напряжения.

Трансформаторы тока работают в режиме, близком к режиму короткого замыкания, так как в их вторичную обмотку включают приборы с малым сопротивлением.

Измерительные трансформаторы тока для частоты 50 Гц изготавливают на номинальные первичные токи до 40 кА и номинальные вторичные токи 5 А (иногда 1 А, 2 А, 2,5 А).

Класс точности трансформаторов тока определяет предельные значения токовой и угловой погрешности и находится в пределах от 0,2 до 10.

Трансформаторы напряжения работают в режиме близком к режиму холостого хода, так как в их вторичную обмотку включают приборы с большим внутренним сопротивлением. Наибольшее влияние на погрешность оказывает нагрузка вторичной цепи трансформатора. Поэтому во вторичную цепь можно включать такое количество приборов, чтобы потребляемая мощность не превышала номинальной мощности трансформатора.

Измерительные трансформаторы напряжения изготавливают на номинальные первичные напряжения до 35 кВ при номинальных вторичных напряжениях $150, 100, 100/\sqrt{3}$.

Definition of measured quantities on the basis of nominal transformer ratios leads to errors.

$$f_I = 100(\kappa_{IH} - \kappa_I) / \kappa_I - \text{current inaccuracy,}$$

$$f_U = 100(\kappa_{UH} - \kappa_U) / \kappa_U - \text{voltage inaccuracy.}$$

Measuring transformers also have a phase displacement as there is an inaccuracy in phase transmission from the primary quantity to the secondary one. The phase displacement influences the measurement of quantities with the help of some instruments (wattmeters, phasemeters), because their readings depend on the phase shift between the currents in circuits of these instruments.

As it is known from the theory, in ideal cases in current transformers the phase shift between the phasors of the secondary current I_2 and the primary one I_1 is 180° . The same phase shift must be between the phasors of the secondary voltage U_2 and the primary one U_1 of the voltage transformer.

Current transformers work in short-circuit conditions, as the instruments with small impedance are connected into their secondary winding.

Measuring transformers for current of frequency 50 Hz are made for nominal primary currents to 40 kA and with nominal secondary current 5 A (sometimes 1 A, 2 A, 2,5 A). Current transformer accuracy rating assigns the limit values of current error and phase displacement and is within the bounds of 0,2 and 10.

Voltage transformers work in no-load conditions, as the instruments with great impedance are connected into the secondary winding. The influence of the transformer load is great, that is why the number of instruments in the secondary circuit should be such as the power requirement does not exceed transformer rating.

Measuring voltage transformers are made for nominal primary voltage to 35 kV with nominal secondary voltages $150, 100, 100/\sqrt{3}$.

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Измерение мощности выполняется с помощью ваттметров (обычно электродинамической или ферродинамической систем). Однофазный ваттметр содержит две катушки, неподвижную и подвижную, соединенную со стрелкой. Она поворачивается против усилия пружины. Неподвижная катушка включается как амперметр последовательно с нагрузкой и называется *токовой обмоткой*. Подвижная катушка включается как вольтметр параллельно нагрузке, пропускает малый ток, пропорциональный по величине напряжению на нагрузке. Она называется *обмоткой напряжения*.

Ваттметр измеряет среднюю за период мощность. В цепи постоянного тока мощность равна $P=U \cdot I$. В цепи синусоидального тока показание ваттметра равно произведению действующих значений напряжения на обмотке напряжения и тока токовой обмотки и косинуса угла между ними: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \operatorname{Re}(\underline{U} \cdot \underline{I}^*)$.

Начала обмоток маркируются специальными знаками – точками или звездочками. Если случается отклонение за шкалу, необходимо поменять местами выводы обмотки напряжения, а измеряемую мощность считать отрицательной. На реальном ваттметре с этой целью используется переключатель “±”.

Потребляемая мощность ваттметра приводит к погрешности, зависящей от способа включения ваттметра. Возможны две схемы включения ваттметра, которые показаны на рисунке. Эти схемы отличаются способом включения параллельной цепи. Схему а) целесообразно использовать для измерения мощности высокоомной нагрузки, а схему б) для измерения мощности низкоомной нагрузки.

В случае измерения мощности чисто активной нагрузки погрешность ваттметра (из-за потребления энергии катушками):

для схемы а) $\delta = P_I / P_H$; для схемы б) $\delta = P_U / P_H$; где P_I , P_U и P_H - мощности, потребляемые, соответственно, последовательной, параллельной обмотками ваттметра и нагрузкой.

ONE-PHASE POWER MEASUREMENT

Power measurement is fulfilled by means of wattmeters (usually of electrodynamic or ferrodynamic measuring system). The single-phase wattmeter contains two coils, one fixed and one carrying a pointer and mounted in bearings so that it can rotate against the restraint of a spring. The fixed coil is connected like an ammeter in series with the load and it is called the *current coil*. The movable coil is connected like a voltmeter across the load and draws a small current, which is proportional to the load voltage; it is called the *potential coil*.

The wattmeter reads the average power during the period. In a d-c circuit this power is equal $P=U \cdot I$. In an a-c circuit the wattmeter reads the product of the rms current in its current coil, the rms voltage across its potential coil, and cosine of the phase-displacement angle between these two quantities: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = \operatorname{Re}(\underline{U} \cdot \underline{I}^*)$.

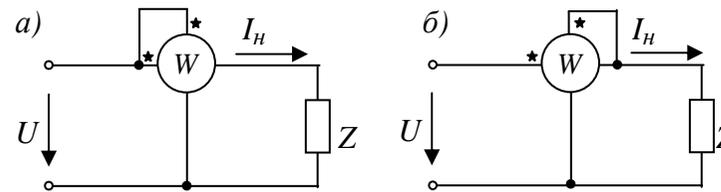
The beginnings of coils are marked by special signs – by stars or dots. If the downscale reading is obtained then the potential coil must be reversed to allow an upscale reading under these conditions and it is necessary to count the meaning of power as negative. In real wattmeter it is made by use of selector switch “±”.

Power requirement of a wattmeter leads to an error depending on the wattmeter connection way.

There are two possible schemes of wattmeter connection, which are shown in the figure. These schemes differ in the way of a parallel circuit connection. Scheme a) is expedient for power measurement of high-ohmic load and scheme б) – for power measurement of low-ohmic load.

In case when we measure purely active load power the wattmeter error (owing to coils power requirement):

for scheme а) is $\delta = P_I / P_H$; for scheme б) is $\delta = P_U / P_H$; where P_I , P_U , P_H - powers consumed, respectively, by series, parallel wattmeter windings and load power.



Схемы включения параллельной обмотки ваттметра
Connection schemes for parallel winding of wattmeter

ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

THREE-PHASE POWER MEASUREMENT

В трехфазной системе независимо от схемы соединения нагрузки (звезда, треугольник) мгновенное значение мощности определяется суммой мгновенных значений мощности отдельных фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C.$$

Активная мощность P определяется выражением:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

где: P_A, P_B, P_C – активные мощности каждой фазы;

U_A, U_B, U_C – фазные напряжения, I_A, I_B, I_C – фазные токи; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – углы фазового сдвига между токами и напряжениями в фазах нагрузки;

T – период изменения напряжения.

Для симметричной трехфазной системы, в которой все напряжения, токи, углы фазового сдвига равны между собой, это выражение примет вид:

$$P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

где U_ϕ, U_L, I_ϕ, I_L – соответственно, фазные и линейные напряжения и токи.

В этом случае при соединении фаз нагрузки звездой (с доступной нулевой точкой) и при соединении фаз нагрузки в треугольник (при условии, что последовательную обмотку ваттметра можно включить в одну из фаз нагрузки) используются схемы представленные на рисунке.

Таким образом, в симметричной трехфазной цепи активная мощность определяется по формуле: $P = 3 P_w$.

In a three-phase system regardless of the load connection scheme (star or delta) an instantaneous power value is determined by sum of instantaneous power values of individual phases:

$$P = p_A + p_B + p_C.$$

Active power P is determined from the following expression:

where: P_A, P_B, P_C – active powers

U_A, U_B, U_C – phase voltages, I_A, I_B, I_C – phase currents;

$\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – phase shifts between currents and voltages in the load phases;

T – period of voltage variation.

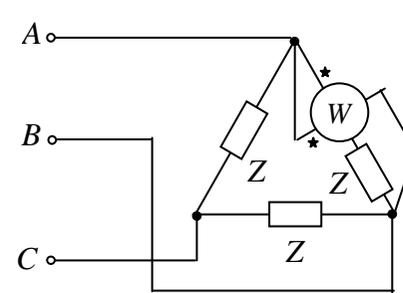
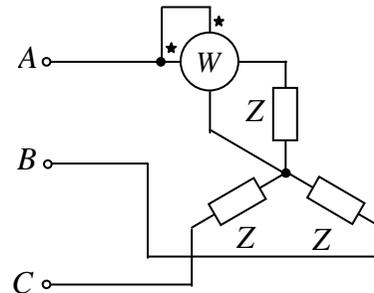
For a balanced three-phase system, where all voltages, currents, phase shifts are equal to each other, this expression becomes:

$$P = 3 U_P I_P \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

where U_P, U_L, I_P, I_L – respectively, phase and line voltages and currents.

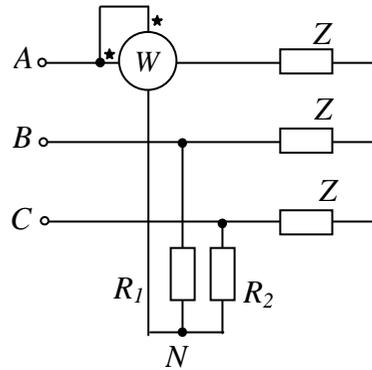
In this case when the load phases are connected in star (with accessible neutral point) and when they are connected in delta (on condition that series wattmeter winding may be connected in one of load phases) the schemes presented in the figure are used.

Thus, in a balanced three-phase circuit active power is determined from the formula: $P = 3 P_w$.



Схемы измерения активной мощности симметричной трехфазной нагрузки одним ваттметром
Schemes of power measurement of balanced three-phase load by one wattmeter

Если симметричная нагрузка трехфазной цепи включена в звезду с недоступной нулевой точкой или в треугольник (когда нет возможности включить ваттметр в фазу нагрузки), то применяют схему с искусственной нулевой точкой, (представлена на рисунке ниже). Искусственная нулевая точка создается с помощью двух дополнительных резисторов с активным сопротивлением R_1 и R_2 . При этом необходимо, чтобы $R_1 = R_2 = R_U$, где R_U - сопротивление параллельной обмотки ваттметра. Для определения мощности всей цепи показания ваттметра нужно утроить.



If a balanced load of the three-phase circuit is connected in star with inaccessible neutral point or in delta (when there is no possibility to connect wattmeter in the load phase), then the scheme with an artificial neutral point is used (presented in the figure below).

An artificial neutral point is made by means of two complementary resistors with resistances R_1 and R_2 . At the same time it is necessary that $R_1 = R_2 = R_U$, where R_U - resistance of a parallel wattmeter winding.

To define the total circuit power the wattmeter readings must be trebled.

При соединении несимметричной нагрузки звездой мгновенная мощность цепи определяется выражением:

When an unbalanced load is connection in star the circuit instantaneous power is determined from the expression:

где: i_A, i_B, i_C , - мгновенные значения фазных токов;

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

where: i_A, i_B, i_C , - instantaneous values of phase currents;
 u_A, u_B, u_C , - instantaneous values of phase voltages.

u_A, u_B, u_C , - мгновенные значения фазных напряжений.

Учитывая, что $i_A + i_B + i_C = 0$ и $u_{AB} = u_A - u_B$; $u_{BC} = u_B - u_C$; $u_{CA} = u_C - u_A$; уравнение для мгновенного значения мощности трехфазной системы можно представить в виде выражений:

Taking into account that $i_A + i_B + i_C = 0$ and $u_{AB} = u_A - u_B$; $u_{BC} = u_B - u_C$; $u_{CA} = u_C - u_A$; equation for the instantaneous value of three-phase circuit power may be presented in the following expressions:

$$p = i_A u_{AC} + i_B u_{BC}; \quad p = i_A u_{AB} + i_C u_{CB}; \quad p = i_B u_{BA} + i_C u_{CA};$$

Эти выражения также справедливы при включении нагрузки треугольником. Переходя от мгновенных значений мощности к средним получим выражения для активной мощности:

These expressions are true for the load connection in delta too. Passing from the instantaneous power values to average ones we shall obtain expressions for active power:

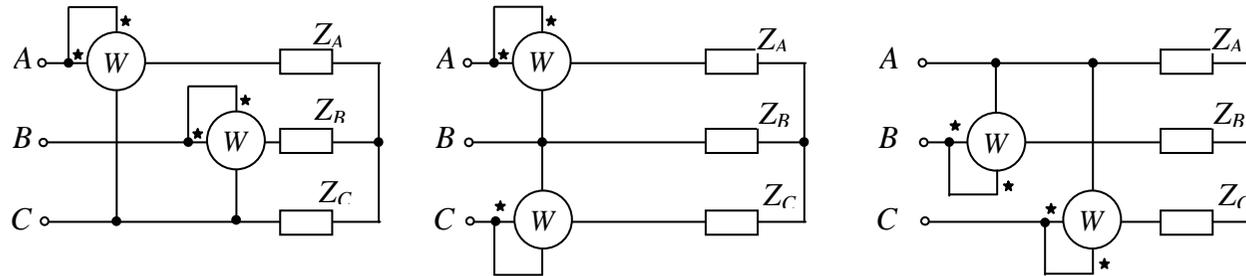
$$P = I_A U_{AC} \cos \beta_1 + I_B U_{BC} \cos \beta_2; \quad P = I_A U_{AB} \cos \beta_3 + I_C U_{CB} \cos \beta_4; \quad P = I_B U_{BA} \cos \beta_5 + I_C U_{CA} \cos \beta_6;$$

где I_A, I_B, I_C ; U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , - действующие значения линейных токов и напряжений; $\beta_1; \beta_2$; и т.д. углы фазового сдвига между соответствующими токами и напряжениями.

where I_A, I_B, I_C ; U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , - effective values of line currents and voltages; $\beta_1; \beta_2$; and so on - phase shifts between corresponding currents and voltages.

Полученные выражения показывают, что активную мощность несимметричной трехфазной трехпроводной цепи можно измерить с помощью двух ваттметров. Для этого токовые обмотки ваттметров включаются в любые две фазы, а обмотки напряжения включаются на свою фазу и на свободную (схемы представлены на рисунке).

The received expressions make it clear that active power of an unbalanced three-phase three-wire circuit may be measured by means of two wattmeters. To do this wattmeter current coils are connected in series with any two line wires, the beginnings of potential coils are connected to the same line wires, and the ends – to the free line wire (schemes are presented in the figure).

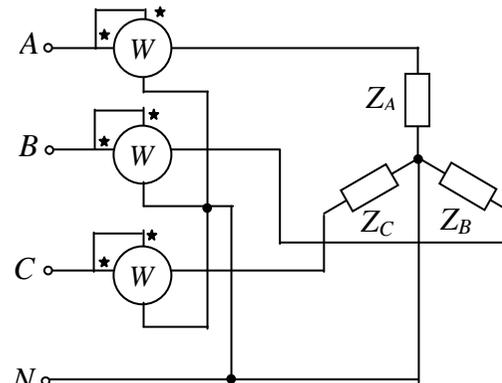


Схемы включения двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной цепи
Connection schemes of two wattmeters for three-phase circuit power measurement

Анализ работы по этим схемам показывает, что в зависимости от характера нагрузки знак показаний каждого из ваттметров может изменяться. Активная мощность в этом случае должна определяться как алгебраическая сумма показаний обоих ваттметров.

Analysis of these schemes makes it clear that in depending on load character the sign of reading of each wattmeter may change. Active power in this case must be determined as algebraic sum of the readings of both wattmeters.

В том случае, когда несимметричная нагрузка включается звездой с нулевым проводом (четырёхпроводная система), применяется схема трех ваттметров, показанная на рисунке. При этом каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы. Полная мощность трехфазной цепи определяется как арифметическая сумма показаний ваттметров.



Методы одного, двух и трех приборов применяются главным образом в лабораторной практике. В промышленных условиях применяются трехфазные ваттметры, которые представляют собой сочетание в одном приборе двух или трех измерительных механизмов, имеющих общую подвижную часть.

In that case, when an unbalanced load is connected in star with neutral (four-wire system), then the scheme of three wattmeters is applied. The scheme is shown in figure. At this each wattmeter measures power of one phase. Total three-phase circuit power is determined as arithmetic sum of wattmeters readings.

Methods of one, two and three instruments are used mainly in laboratory practice. In the industrial conditions three-phase wattmeters are applied. They represent in one instrument the union of two or three measuring mechanisms having common movable part.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Измерение неэлектрических величин производят при изучении физических явлений, определении состава и свойств веществ, при контроле и управлении технологическими и производственными процессами, при контроле качества продукции и т.д. Среди множества величин, которые необходимо измерять, значительное их число является неэлектрическими. Промышленность выпускает разнообразные приборы и преобразователи для измерения неэлектрических величин, причем среди них значительную долю составляют электрические средства измерения. Причины широкого применения электроизмерительных приборов для измерения неэлектрических величин заключается в следующем:

- приборы позволяют осуществлять дистанционные измерения;
- в приборах возможны автоматические преобразования результатов измерения (например, введение поправок);
- приборы более удобны (по сравнению с неэлектрическими) для решения задач автоматического управления;
- приборы позволяют регистрировать как очень медленные, так и быстро меняющиеся величины, могут иметь широкий диапазон измерений.

Особенностью электрических приборов для измерения неэлектрических величин является обязательное наличие измерительного преобразователя неэлектрической величины в электрическую. Измерительный преобразователь устанавливает однозначную функциональную зависимость выходной электрической величины от входной измеряемой неэлектрической величины. В зависимости от вида выходного сигнала все измерительные преобразователи делятся на параметрические и генераторные.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В параметрических преобразователях выходной величиной является параметр электрической цепи (R , L , M , C). При использовании параметрических преобразователей необходим дополнительный источник питания, который служит для получения выходного сигнала преобразователя.

MEASUREMENT OF NONELECTRICAL QUANTITIES BY ELECTRICAL METHODS

Measurement of nonelectrical quantities is fulfilled at examination of physical phenomena, definition of composition and properties of matter, at control of manufacturing and industrial processes, at control of product quality etc. Among the great number of quantities to be measured there are many nonelectrical quantities. Industry produces various devices and gauges for measurement of nonelectrical quantities, and among them electrical means are of major part. The reasons of wide application of electrical means for measurement of nonelectrical quantities are in following:

- electrical devices permit to realize remotely sensed measurements;
- in devices automatic result transformations are possible (for example, corrective action);
- electrical devices are more handy (in comparison with nonelectrical one) for solution of automatic control problems;
- electrical devices permit to record slow variables as well as fast variables, they can have wide range of measurements.

The peculiarity of electrical devices for measurement of nonelectrical quantities is that they necessarily have gauge or instrument transducer of a nonelectrical quantity into electrical one. The measuring transducer sets unequivocal functional dependence of output electrical quantity on input measured nonelectrical quantity.

Depending on input signal mode all transducers are divided onto parametrical ones and producers ones.

PARAMETER-ORIENTED TRANSDUCERS

In parametric transducers the electrical circuit parameter (R , L , M , C) serves as an output quantity. Using parameter-oriented transducers needs the additional power source serving for output signal receipt.

Реостатные преобразователи.

Реостатные преобразователи основаны на изменении электрического сопротивления проводника под влиянием входной величины – перемещения. Это реостат, подвижный контакт которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины. Конструктивно реостатный преобразователь может выполняться для линейного или углового перемещения.

Преобразователь состоит из обмотки, нанесенной на каркас и щетки. Каркас изготавливают из диэлектриков или металла, для обмотки обычно используют изолированный провод (очищенный от изоляции в местах соприкосновения со щеткой).

Для получения нелинейной функции преобразования используется каркас определенного профиля.

В рассматриваемых реостатных преобразователях статическая характеристика преобразования имеет ступенчатый характер (скачки равны сопротивлению одного витка). Это вызывает погрешность, максимальное значение которой $\gamma = \frac{\Delta R}{R}$, где ΔR - сопротивление одного витка; R - полное сопротивление реостата.

Иногда применяют реохордные преобразователи, в которых щетка скользит вдоль оси проволоки. У этих преобразователей отсутствует указанная погрешность.

Тензочувствительные преобразователи (тензорезисторы).

В основу работы преобразователей положен тензоэффект, заключающийся в изменении активного сопротивления проводника (полупроводника) под воздействием вызываемого в нем механического напряжения и деформации. Относительное изменение сопротивления проволоки $\frac{\Delta R}{R} = S \Delta l / l$,

где S - коэффициент тензочувствительности, $\Delta l / l$ - относительная деформация проволоки.

Изменение сопротивления при механическом воздействии объясняется изменением геометрических размеров (длины, диаметра) и удельного сопротивления материала.

Rheostat transducers

Rheostat transducers are based on changing wire resistance under the influence of input quantity – displacement. This is the rheostat, whose movable contact travels under the effect of measured nonelectrical quantity. The design of a rheostat transducer may be for linear or angular displacement.

The transducer consists of the coil wound on a frame and a brush. The frame is made of dielectric or metal, for the winding the insulated wire (free of isolation in places for contact with the brush) is usually used.

To obtain nonlinear transformation function the frame of the definite profile is used.

In rheostat transducers under consideration static transformation characteristic has a stepped character (one step is equal to the resistance of one turn). It gives the error with the maximal value $\gamma = \frac{\Delta R}{R}$, where ΔR - resistance of one turn; R - total rheostat resistance.

Sometimes are applied slide-wire transducers, where brush slides along the wire axis. These transducers are free of the error mentioned above.

Pickoffs (resistive-strain sensors).

Pickoff is based on the effect of the conductor (semiconductor) resistance change under the influence of mechanical stress or resilience. Relative variation of wire resistance

$$\frac{\Delta R}{R} = S \Delta l / l,$$

where S - gage factor, $\Delta l / l$ - relative wire resilience.

Resistance variation under the influence of mechanical force is explained by variation of geometrical dimensions (length, diameter) and material resistivity.

Изменение температуры вызывает изменение характеристики преобразования тензорезисторов, что объясняется температурной зависимостью сопротивления преобразователя и различием температурных коэффициентов линейного расширения материалов тензорезистора и исследуемой детали.

В тех случаях, когда требуется высокая чувствительность, применяют преобразователи, выполненные из полосок из полупроводникового материала.

Тензорезисторы применяют для измерения деформаций и других неэлектрических величин: усилий, давлений, моментов и т.п.

Термочувствительные преобразователи (терморезисторы)

Принцип работы преобразователей основан на зависимости электрического сопротивления проводников или полупроводников от температуры. Терморезистор включается в цепь, с помощью которой производится измерение его сопротивление, по нему протекает ток, выделяющий в нем теплоту. Интенсивность теплообмена, а следовательно, и температура терморезистора зависят от его геометрических размеров и формы, от конструкции, от состава, плотности, теплопроводности и других свойств среды, окружающей терморезистор, а также от температуры и скорости перемещения среды. Таким образом, зависимость температуры, а следовательно, и сопротивления терморезистора от перечисленных выше факторов может быть использована для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих среду.

По режиму работы терморезисторы бывают перегревные и без перегрева. В преобразователях без перегрева ток, проходящий через терморезистор, практически не вызывает его нагрев, и температуру последнего определяет температура среды. Эти преобразователи применяют для измерения температуры.

Для измерения температуры наиболее распространены терморезисторы, выполненные из платиновой или медной проволоки. На основе терморезисторов построены схемы термометров сопротивления. Стандартные платиновые терморезисторы применяют для измерения температуры в диапазоне от -260 до $+1100$ °С, медные - в диапазоне от -200 до $+200$ °С.

Temperature variation causes change of resistive-strain sensor transformation characteristic, and this is explained by sensor resistance dependence on temperature and by differences in temperature linear expansion coefficients of sensor material and the detail under study.

When high sensitivity is necessary, sensors made of semiconductor strips are applied.

Resistive-strain sensors are used for measurement of strains and other nonelectrical quantities: forces, pressure, torque and so on.

Thermosensitive transducer (thermistors)

Thermosensitive transducer operation principle is based on conductor or semiconductor electrical resistance dependence on temperature. A thermoresistor (thermistor) is connected into a circuit to measure its resistance. The current flows through the thermistor heating it. Heat-exchange rate, and consequently, thermistor temperature depend on its geometrical dimensions and form construction, composition, density, thermal conductivity and other properties of environment, as well as on temperature and the speed of the environment traverse. Thus, the dependence of temperature, and consequently, thermistor resistance on the factors mentioned above may be used to measure different nonelectrical quantities characterizing the environment.

According to the operational conditions thermistors can be with or without thermal overload. In transducers without thermal overload the current flowing through the thermistor does not heat it, and thermistor temperature is defined by the environment temperature. These transducers are applied to measure temperature.

Thermistors, made of platinum or copper wire are widely used to measure the temperature. The schemes of the resistance thermometers are made on basis of thermistors. Standard platinum thermistors are applied for temperature measurement in the range from -260 to $+1100$ °С, and copper ones – in the range from -200 to $+200$ °С.

Аналитическая зависимость сопротивления от температуры для платиновых терморезисторов выражается следующими уравнениями:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \text{ где } R_0 - \text{сопротивление при } t = 0^\circ\text{C},$$

$$A = 3.968 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}; B = 5.847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}.$$

Для медных терморезисторов:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \text{ где } R_0 - \text{сопротивление при } t = 0^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 4.26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

На основе терморезисторов построены электрические термометры сопротивления, в которых терморезистор включен в измерительную цепь, представляющую собой измерительный мост.

Для измерения температуры применяют также полупроводниковые терморезисторы (термисторы), которые характеризуются большей чувствительностью (ТКС терморезисторов отрицательный и в 10 – 15 раз превышает ТКС меди и платины) и имеют более высокое сопротивление (до 1 МОм) при весьма малых размерах. Недостаток термисторов – плохая воспроизводимость и нелинейность характеристики преобразования:

$$R_t = R_0 \exp[B(1/t - 1/t_0)],$$

где R_t и R_0 - сопротивление при температурах t и t_0 ;

t_0 - начальная температура рабочего диапазона;

B – коэффициент.

В перегревных преобразователях электрический ток вызывает перегрев, зависящий от свойств среды. Преобразователи этого типа используются для измерения скорости, плотности, состава среды и т.д.

В приборах для газового анализа – газоанализаторах – для измерения теплопроводности используют перегревный терморезистор помещенный в газовую камеру с анализируемым газом. Конструкцию терморезистора и камеры, а также значение нагревающего тока выбирают такими, чтобы теплообмен со средой осуществлялся в основном за счет теплопроводности газовой среды. По полученному значению теплопроводности судят о составе газовой смеси.

Analytical dependence of resistance on temperature for platinum thermistors is expressed by the following equations:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \text{ where } R_0 - \text{resistance at } t = 0^\circ\text{C},$$

$$A = 3.968 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}; B = 5.847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}.$$

For copper thermistors:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \text{ where } R_0 - \text{resistance at } t = 0^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 4.26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Electrical resistance thermometers are constructed on the basis of thermistors. In this case the thermistor is connected with resistance measuring bridge.

For temperature measurement the semiconductor thermistors are also applied, which are characterized by high sensitivity (TKC of thermistors is negative and exceeds copper and platinum TKC by dozens of times) and have higher resistance (to 1 Mohm), having small sizes). The disadvantage of thermistors is their low reproducibility and nonlinearity of a transformation characteristic:

$$R_t = R_0 \exp[B(1/t - 1/t_0)],$$

where R_t and R_0 - resistance at temperatures t and t_0 ;

t_0 - initial temperature of a working range;

B – coefficient.

In transducers with thermal overload the current causes heating, depending on the environment properties. Transducers of this type are used to measure speed, density, environment composition etc.

In devices for gas composition analysis – in gas analyzers a thermistor with thermal overload placed into a chamber with gas under study is used to measure thermal conductivity. The thermistor and chamber design as well as the value of heating current are chosen in that manner the heat exchange with the environment is realized mainly at the expense of thermal conductivity of gas environment.

The gas mixture composition is judged on the basis of the obtained value of thermal conductivity

Терморезисторы применяют также в приборах для измерения степени разреженности (вакуумметры), в которых по величине теплопроводности газа по известным зависимостям определяют давление (разреженность).

Терморезисторы применяют в приборах для измерения скорости газового потока – термоанемометрах. Установившаяся температура перегретого терморезистора, помещенного на пути газового потока, зависит от скорости потока. В этом случае теплообмен терморезистора со средой определяет скорость движения среды и температуру терморезистора.

Электролитические преобразователи

Электролитические преобразователи основаны на зависимости электрического сопротивления раствора электролита от его концентрации. В основном применяются для измерения концентрации растворов. Преобразователь представляет собой сосуд с двумя электродами. Часто в качестве второго электрода выступают стенки сосуда (металлические).

Индуктивные преобразователи

Принцип действия преобразователей основан на зависимости индуктивности или взаимной индуктивности обмоток на магнитопроводе от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов магнитной цепи. Индуктивность и взаимную индуктивность можно изменять, воздействуя на длину или сечение воздушного промежутка между сердечником и якорем магнитной цепи. Это можно достичь перемещением подвижного якоря относительно неподвижного сердечника, введением в воздушный зазор немагнитной пластины и т.д. Индуктивные преобразователи используют для преобразования перемещения и других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (усилие, давление, моменты и т.д.).

Thermistors are also applied in devices to measure vacuity degree (vacuum-gauges), in which the pressure (vacuity) is determined according to the value of gas thermal conductivity under known dependences.

Thermistors are applied in devices for measurement of gas stream speed – in heat-loss anemometer. The steady-state temperature of a thermistor with thermal overload, which is placed on the path of gas stream, depends on stream speed. In this case heat exchange between a thermistor and environment determines environment speed and thermistor temperature.

Electrolytic transducers

Electrolytic transducers are based upon the dependence of electrical resistance of electrolytic solution on its concentration. Generally they are applied for measurement of solution strength. A transducer is a vessel with two electrodes. Metallic vessel walls often serve as the second electrode.

Inductive gauges

Operating principle of inductive type transducers is based upon the dependence of inductance or mutual inductance of iron-core coils on position, geometric dimensions and magnetic state of the magnetic circuit elements. Inductance and mutual inductance can be changed influencing the length or cross-section of the air gap between the core and armature of the magnetic circuit. It can be made by displacing the movable armature in relation to the immovable core or by insertion a nonmagnetic lamina into the air gap and so on. Inductive transducers are used for transformation of displacement and other nonelectrical quantities, which can be transformed into displacement (force, pressure, torque etc).

Емкостные преобразователи

Емкостные преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, взаимного положения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними. Преобразователь представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается под воздействием измеряемой величины относительно неподвижной пластины.

Для измерения выходного параметра емкостных преобразователей используют мостовые схемы и цепи с использованием резонансных контуров, что позволяет создавать приборы с высокой чувствительностью, способные реагировать на перемещения порядка 10^{-7} мм. Цепи с емкостными преобразователями обычно питают токами токком повышенной частоты (до десятков мегагерц), что вызвано желанием увеличить сигнал и уменьшить шунтирующее действие сопротивления изоляции.

ГЕНЕРАТОРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В генераторных преобразователях выходной величиной является ЭДС или заряд, функционально связанные с измеряемой неэлектрической величиной.

Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрические преобразователи основаны на термоэлектрическом эффекте, возникающем в цепи термопары.

При разности температур точек 1 и 2 соединения двух разнородных проводников А и В, образующих термопару, в цепи термопары возникает термо-ЭДС. Для измерения термо-ЭДС электроизмерительный прибор (милливольтметр, компенсатор) включают в цепь термопары. Точку соединения проводников называют рабочим концом термопары. Чтобы термо-ЭДС в цепи термопары однозначно определялась температурой рабочего конца, необходимо температуру свободных концов термопары поддерживать одинаковой и неизменной.

Для изготовления термопар, применяемых в настоящее время для измерения температуры, используют специальные сплавы:

Capacitance-type transducer

Capacitive are based upon the dependence of electric capacity of a condenser on dimensions, relative position of its plates and on dielectric permeability of the medium between them. Transducer presents a condenser, one plate of which moves under the influence of measured quantity in relation to the immovable plate.

To measure the output parameter of capacitive transducers bridge circuits and schemes of resonant circuit are used, and this allows to create the devices with high sensitivity, which are able to respond to displacement of order 10^{-7} mm. Circuits with capacitive are usually supplied with high frequency currents (to tens of MHz), which is caused by the wish to increase the signal and decrease shunt action of isolation resistance.

GENERATOR MEASURING TRANSDUCERS

In generator measuring transducers emf or a charge, which are functionally related to a measured nonelectrical quantity are the output quantity.

Thermoelectrical transducers

Thermoelectrical transducers are based upon the thermo-electrical effect arising in a thermocouple circuit.

When there is a temperature difference between points 1 and 2 of the connection of two dissimilar conductors А and В, forming the thermocouple, thermo-emf arises in the thermocouple circuit. For its measurement the electrical-type instrument (millivoltmeter, compensator) is connected with the thermocouple circuit. The connection point is called the thermojunction. For unambiguous definition of emf in the thermocouple circuit by thermojunction temperature it is necessary to keep the temperature of thermocouple free ends constant and stable.

At present time thermocouples are made from the following alloys:

ТХА: хромель (90%Ni+10%Cu) – алюмель (94,8%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si);

ТХК: хромель – копель (56%Cu+44%Ni).

Термо-ЭДС при разности температур 100⁰С и верхний предел для термопар указанных выше составляет соответственно: ТХА - 4.1 мВ, 1000⁰С; ТХК – 6.9, 600⁰С.

Статические характеристики преобразования различных стандартных типов термопар задаются в виде градуировочных таблиц.

Для защиты от внешних воздействий электроды термопар помещают в защитную арматуру. Приборы, использующие термоэлектрические преобразователи, называются термоэлектрическими термометрами.

Индукционные преобразователи

Работа индукционных преобразователей основана на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому ЭДС, наводимая в катушке, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с катушкой. Индукционные преобразователи применяют для измерения скорости линейных и угловых перемещений. Выходной сигнал этих преобразователей может быть проинтегрирован или продифференцирован по времени с помощью специальных электрических устройств. После этих преобразований информативный параметр сигнала становится пропорциональным, соответственно, перемещению или ускорению.

Наибольшее применение индукционные преобразователи получили для измерения угловой скорости (тахометры). Они представляют собой небольшие (1 – 100 Вт) генераторы постоянного или переменного тока с независимым возбуждением от постоянных магнитов, ротор которых механически связан с валом испытуемого механизма.

Пьезоэлектрические преобразователи

Такие преобразователи основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в появлении электрических зарядов на поверхности кристаллов (кварц, турмалин и пр.) под влиянием механических напряжений.

ТХА: Chromel (90%Ni+10%Cu) – alumel (94,8%Ni+2%Al+2%Mn+1%Si);

ТХК: Chromel – Copel (56%Cu+44%Ni).

Thermo-emf at temperature difference 100⁰С and upper limit for the mentioned above thermocouples is respectively: ТХА - 4.1 мВ, 1000⁰С; ТХК – 6.9 мВ, 600⁰С.

Static transformation characteristics for different standard types of thermocouples are presented in form of standard reference tables.

To protect a thermocouple against external actions its electrodes are placed into a protective tube. Devices using thermocouples are called thermoelectric thermometers.

Induction transducers

Operation of induction transducers is based upon the application of Faraday's law, in accordance with which emf, induced in the coil, is proportional to variation speed of magnetic flux linked with a coil. Induction transducers are applied to measure linear and angular displacements speed. The output signal from these transducers may be integrated or differentiated in time by means of special electrical devices. After these transformations the informative parameter of a signal becomes proportional, respectively, to displacement or acceleration.

The induction transducers are most widely used to measure angular velocity (tachometers). They are small (1 – 100 W) DC or AC generators with independent excitation from permanent magnets, whose rotor is mechanically connected with shaft of mechanism under study.

Piezoelectric transducers (bimorphs)

Such transducers are based upon the usage of direct piezoelectric effect, consisting in appearance of electric charges on the surface of crystals (quartz, tourmaline and others) under the influence of mechanical stress.

В пьезоэлектрических преобразователях главным образом применяют кварц, у которого пьезоэлектрические свойства сочетаются с высокой механической прочностью и высокими изоляционными свойствами, а также с независимостью пьезоэлектрической характеристики от температуры.

Заряд, возникающий в пьезоэлектрическом преобразователе, может быть измерен с помощью приборов с высоким входным сопротивлением (10^{12} - 10^{15} Ом), для чего на практике используют электронные усилители.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.

Список физических величин, подлежащих техническому измерению электрическими методами, довольно велик и включает деформацию, температуру, механические размеры, пониженное давление, сжатие, вибрацию, потоки жидкостей и газов, угловую и линейную скорости, работу, лучистую энергию, шум и шумовой уровень, химические и молекулярные условия, геофизические данные, физиологические условия. По существу, разработка метода измерения любой величины электрическими средствами сводится к трем этапам: 1) конструирование электрической цепи, в которой некоторое присущее ей свойство находится под влиянием измеряемой величины; 2) подготовка электрических приборов для измерения изменений этого свойства и индикации или записи величины этих изменений; 3) калибровка приборов или корректировка их показаний с измеряемой величиной. Например, электрическим свойством может быть сопротивление, индуктивность, емкость цепи или термо-ЭДС, создаваемая объединением двух разнородных металлов. Если выбранным свойством является сопротивление, его изменения могут быть измерены мостом Уитстона. Если изучаемой величиной является температура, то прибор, измеряющий небаланс моста, может быть проградуирован непосредственно в градусах. Эта калибровка может быть выполнена расчетным путем, если температурный коэффициент сопротивления известен, или путем сравнения отклонения гальванометра с показанием другого измеряющего температуру прибора.

In piezoelectric transducers the quartz is generally applied because its piezoelectric properties are combined with high mechanical strength and high isolation properties and its piezoelectric characteristic does not depend on temperature.

The charge arising in a piezoelectric transducers may be measured by means of devices with high input impedance (10^{12} - 10^{15} Ohm), for that in practice the electronic amplifiers are used.

MEASUREMENT OF NONELECTRICAL QUANTITIES.

The list of physical quantities subject to commercially successful measurement by electrical methods is a long one and includes strain, temperature, mechanical dimensions, vacuum (depression), compression and vibration, flow of liquids and gases, angular and linear speed, work, radiant energy, noise and noise levels, chemical and molecular conditions, geophysical-prospecting data, and physiological conditions. Fundamentally, a devising method of measuring any quantity by electrical means reduces to three steps: 1) constructing an electric circuit in which some of its inherent property is affected by the quantity to be measured, 2) arranging electrical instruments to detect changes in this property and to indicate or record the extent of these changes, and 3) calibrating the instrument or correlating its indication with the value of the quantity to be measured. For example, the electrical property may be the resistance, inductance, or capacitance of a circuit, or it may be the thermoelectromotive force produced at the junction of two dissimilar metals. If resistance is the property selected, changes may be detected by a bridge. If the quantity concerned is temperature, then the detector measuring the bridge unbalance may be calibrated to read directly in degrees. This calibration may be done by computation if the temperature coefficient of the resistance is known, or it may be done by correlating galvanometer deflection with the reading of some other temperature-measuring device.

Мостовые методы используются во многих случаях, главным образом, по двум причинам. Во-первых, электрическое свойство может находиться под влиянием не только измеряемой величины, но также и под воздействием внешних условий. Например, при измерении деформации по изменению сопротивления температурные колебания могут маскировать определенные эффекты. Компенсация может быть достигнута в мостовом измерении использованием имитатора тепловыделяющего элемента в плече, учитывающем эти внешние условия. Во-вторых, обычно нужно измерять изменения. Возможностью уравновесить начальные условия и в дальнейшем учитывать только отклонения от этого баланса как раз и обладают мостовые схемы.

Несколько специфических примеров. Датчики деформации, основанные на изменении сопротивления маленькой проволоочки, вызванном изменением её длины, нашли широкое применение во всех областях техники. Из проволоки диаметром около 0,001 дюйма изготавливается мелкая сетка, которая размещается на обратной стороне бумагоподобной ткани и крепится к телу смолистым или целлюлозным клеем. Она может выдерживать изменения длины до 1 процента или даже больше и может давать примерно линейное изменение сопротивления от 2 до 3,5 процента на 1 процент изменения длины. Начальное сопротивление датчика находится между 100 и 1000 Ом, а номинальный измерительный ток – порядка 30 мА. Принцип датчика деформации, очевидно, может быть легко приспособлен для измерения давления газа или жидкости, веса, механических сил и т.д.

Измерения температуры основаны на изменении сопротивления или появлении ЭДС у термопары при изменении температуры; при изменении температуры в широком диапазоне используются радиационные или оптические пирометры (здесь не рассматриваются). Резистивные термометры состоят из резистивной колбы содержащей маленькую катушку из платиновой, никелевой или медной проволоки, формирующей одно плечо моста, и остальной части моста размещённой там, где будет производиться отсчет показаний.

Bridge methods are used in many of these cases, principally for two reasons. First, the electrical property may be influenced not only by the quantity to be measured but also by extraneous conditions. When the strain is measured on the basis of change in resistance, for example, temperature changes may mask the sought-after effects. Compensation may be obtained in a bridge measurement by using a dummy element in the arm subjected to the same extraneous conditions as the active element. Second, it is usually necessary to measure changes. Namely bridge circuits have the ability to balance out the initial conditions and further take into account only the deviation from this balance.

Some Specific Examples. Strain gauges based on change of resistance of a small wire when changing its length are in wide use in all fields of engineering. The wire, about 0,001 in. in diameter, is usually shaped into a grid, as in fig., with a paperlike backing and fastened to the member with a resinous or cellulose cement. It can withstand axial changes in length up to 1 per cent or more and may produce an approximately linear change in its resistance of 2 to 3,5 per cent for a 1 per cent change in length. The initial resistance of the gauge is between 100 and 1000 ohms, and the normal measuring current is of the order of 30 mA. The principle of the strain gauge can evidently be readily adapted to measurement of liquid or gas pressure, weight, mechanical forces, etc.

Temperature measurements may be based on change of resistance with temperature or on the emf of a thermocouple; in the higher temperature ranges, radiation or optical pyrometers (not considered here) are used. Resistance thermometers consist of a resistance bulb containing a small coil of platinum, nickel, or copper wire forming one arm of a bridge, the remainder of the bridge being located where the indication is desired.

В общем, температурные изменения происходят медленно, поэтому показывающий прибор (со шкалой) или самобалансирующийся мост используется для получения неизвестной температуры. Собственная точность резистивного термометра высока, и они используются измерения температуры в широких пределах (-190 до 600°C).

Механические размеры могут быть удобно измерены на основе изменения индуктивности или емкости, преимущество электрических методов над механическими заключается в возможности большого усиления малых изменений размеров (до 50 000 раз) и в приспособленности их к автоматическому управлению процессами.

Механическая вибрация может быть изучена по отклонению ленточной диафрагмы, которая происходит в соответствии с вибрацией и приводит к изменению сопротивления, индуктивности или емкости в плече моста. В принципиально ином методе используется пьезоэлектрический эффект, посредством которого в некотором кристалле, создается разность потенциалов, когда кристалл подвергают деформации. Особой подготовкой и изготовлением кристалла можно достичь напряжения в несколько вольт, которое можно наблюдать с помощью электронно-лучевого осциллографа.

Вакуумные датчики теплового типа часто используются для измерения давления газа в разреженном пространстве. Их действие основано на том, что в условиях разреженности тепловая проводимость газа зависит от его давления. Если нагретую проволоку внести в разреженное пространство, то рассеяние тепла от проволоки и, следовательно, её сопротивление будут характеризовать степень разреженности. Мост постоянного тока с милливольтметром, отградуированном в микронах, используется для измерения сопротивления. Эти датчики, правда, подвержены некоторому тепловому запаздыванию.

Some thermal changes are generally slow, an indicating instrument or a self-balancing recording bridge is used to give the unknown temperature. The intrinsic accuracy of resistance thermometers is high, and they are used for temperature measurement in wide bounds (-190 to 600°C).

Mechanical dimensions may be measured conveniently in terms of change of inductance or capacitance, potential advantages over mechanical methods being high amplification of small dimension changes (up to 50 000) and adaptability to automatic control of machining processes.

Mechanical vibration may be studied by causing the deflection of a ribbon diaphragm to follow the vibration and to change the resistance, inductance, or capacitance of a bridge arm. An entirely different method is to use the piezoelectric effect, whereby electric potentials are produced in certain crystals, when they are placed under stress. By proper preparation and treatment of the crystal, potentials of several volts can be observed on a cathode-ray oscillograph.

Vacuum gauges of the hot-wire type are frequently used for the measurement of gas pressures in evacuated space. They depend for their operation on the fact that under high-vacuum conditions the thermal conductivity of a gas varies with its absolute pressure. If a heated wire is introduced into the evacuated space, the heat dissipation from the wire and consequently its resistance indicate the degree of vacuum. A d-c bridge with a millivoltmeter calibrated in microns as a detector is used to measure resistance. These gauges are subject to some thermal time lag.