

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть 1. Основы метрологии и электрические измерения	4
Основные понятия и определения	4
Классификация измерений	7
Погрешности измерений. Обработка результатов измерений	9
Обработка результатов измерений.....	13
Часть 2. Измерительные сигналы.....	16
Характеристики электрического сигнала.....	17
Непериодические сигналы (импульсы)	20
Преобразование и обработка измерительных сигналов	22
Часть 3. Общие свойства электромеханических измерительных приборов	24
Состав электромеханических приборов	25
Общие механические свойства электромеханических ИП.....	27
Общие электротехнические свойства ИП	29
Классы точности электромеханических ИП	30
Классификация электронных и цифровых измерительных приборов	33
Часть 4. Электромеханические измерительные приборы	37
Приборы магнитоэлектрической системы	37
Приборы электромагнитной системы.....	40
Приборы электродинамической системы.....	43
Применение приборов электродинамической системы.....	45
Приборы ферродинамической системы	51
Приборы индукционной системы. Счетчик электроэнергии	52
Схемы включения одно- и трехфазных счетчиков электроэнергии	54
Приборы электростатической системы	57
Приборы магнитоэлектрической системы с входными преобразователями	59

I. ПМЭС с выпрямителями.....	59
II. ПМЭС с термопреобразователями.....	61
III. ПМЭС с электронными входными преобразователями (электронные вольтметры)	62
Часть 5. МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ	65
Одинарный мост	66
Двойной мост	68
Мост переменного тока.....	70
Мост переменного тока для измерения индуктивности	71
Мост переменного тока для измерения емкости	72
Погрешности мостов	73
Часть 6. Измерительные генераторы.....	74
ИГ низкой частоты	74
Импульсный ИГ	76
Часть 7. ОСЦИЛЛОГРАФЫ	78
Электронно-лучевой осциллограф общего назначения. Принцип действия	79
Основные характеристики осциллографа	87
Светолучевой осциллограф	88
Часть 8. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	91
Цифровые вольтметры постоянного тока	96
Электронно-механический цифровой вольтметр с кодоимпульсным преобразованием	96
Электронный цифровой вольтметр с времяимпульсным преобразованием.....	98
Электронный цифровой вольтметр с частотноимпульсным преобразованием (интегрирующий)	100
Электронный цифровой вольтметр с двойным интегрированием.....	102
Электронные цифровые вольтметры с комбинированным преобразованием....	104

Цифровые вольтметры переменного тока.....	104
Цифровой (электронно-счетный) частотомер.....	105
Цифровые измерители интервалов времени.....	108
Измеритель ИВ с преобразованием интервала в пропорциональное ему число импульсов	108
Измеритель ИВ с преобразованием масштаба времени	109
Цифровой (электронно-счетный) фазометр.....	111
Цифровой RC-измеритель	112

Часть 1. Основы метрологии и электрические измерения

Основные понятия и определения

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

Измерение – процесс, заключающийся в определении значения физической величины опытным путем с помощью технических средств измерения.

Результат измерения – число принятых для данной физической величины единиц, дающее информацию о свойствах этой величины.

Основная формула измерения:

$$X = A_X X_e,$$

где X – результат измерения,

A_X – измеряемая величина,

X_e – единица измерения.

Истинное значение физической величины – значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

(Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений.)

Действительное значение физической величины – значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Погрешность результата измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.

Точность измерения – степень близости результата измерения к истинному (действительному) значению измеряемой величины.

(Истинное значение величины неизвестно, оно применяется только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение величины.)

Измерительный эксперимент – научно обоснованный опыт для получения количественной информации с требуемой точностью определения результата измерений.

Средство измерений – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимают неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

Средства измерений бывают:

1. Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров.

Различают следующие разновидности мер:

1.1. *однозначная мера* – мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря 1 кг);

1.2. *многозначная мера* – мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);

1.3. *набор мер* – комплект мер разного размера одной и той же физической величины, предназначенных для применения на практике как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);

1.4. *магазин мер* – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

2. Измерительный прибор (ИП) – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

По способу представления информации различают ИП:

2.1. *Показывающие* – дают возможность визуального отсчета информации;

2.2. *Регистрирующие* – осуществляют документирование информации на каком-либо носителе;

2.3. *Интегрирующие* – регистрируют информацию с накоплением по какой-либо переменной (например, за период времени).

3. Измерительные преобразователи – средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, удобную для передачи, обработки или хранения, но не поддающейся восприятию наблюдателем.

Измерительные преобразователи бывают:

3.1. *Первичные* – расположены в цепи, куда непосредственно подводится измеряемая величина (ИВ) (например, измерительные трансформаторы напряжения или тока);

3.2. *Промежуточные* – расположены на любом участке цепи после первичного;

3.3. *Передающие* – предназначены для дистанционной передачи сигнала информации;

3.4. *Масштабные* – изменяют измеряемую величину в заданное число раз, не изменяя ее вида (например, делитель напряжения, потенциометр – см. рис. 1).

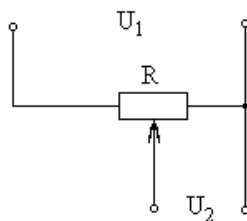


Рисунок 1 - Масштабный преобразователь (потенциометр)

Классификация измерений

По способу получения результата измерения бывают:

1. Прямые – искомое значение величины находят непосредственно по показаниям средства измерений (например, измерение тока амперметром, промежутка времени секундомером, рис. 2). Обозначаются $Y=X$ (Y – значение ИВ, X – результат ее непосредственного измерения).

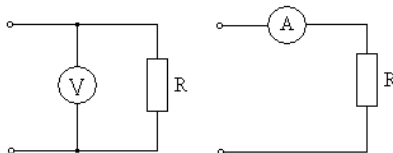


Рисунок 2 - К понятию прямых измерений

2. Косвенные – искомое значение величины находят расчетом на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, функционально связанными с искомой и определяемыми посредством прямых измерений. Другими словами, искомое значение физической величины рассчитывают по формуле, а значения величин, входящих в формулу, получают измерениями (например, измерение сопротивления R на основании измерения тока и напряжения и расчета по формуле $R=U/I$). Обозначаются $Y=f(X_1, X_2, \dots X_n)$, где $X_1, X_2, \dots X_n$ – значения величин, получаемых из прямых измерений.

3. Совместные – одновременные измерения двух или нескольких разнородных величин для определения зависимости между ними (например, ряд одновременных, прямых измерений электрического сопротивления проводника и его температуры для установления зависимости сопротивления от температуры).

4. Совокупные – одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин (нахождение значений массы отдельных гирь набора по известному значению массы одной из гирь: сравнивая массы различных сочетаний гирь, получают систему уравнений, из решения которой находят массу каждой из гирь, входящих в набор).

Совокупность приёмов использования принципов и средств измерений называется методом измерения.

Методы измерений бывают:

1. Метод непосредственной оценки – измеряемую величину оценивают непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора, заранее отградуированного в соответствующих единицах.

(Здесь мера не принимает непосредственного участия в процессе измерения, ее размеры перенесены на шкалу прибора заранее, при градуировке.)

2. Метод сравнения – измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой; здесь мера непосредственно участвует в каждом измерении. Метод более точен, но более сложен и дорог по сравнению с п.1.

Разновидности метода сравнения:

2.1. *Дифференциальный (разностный)* метод – измерительным прибором оценивается разность $\Delta A = A_x - A_0$ между измеряемой величиной A_x и образцовой мерой A_0 (чем меньше ΔA , тем выше точность).

2.2. *Нулевой* метод (метод *полного уравнивания*) – частный случай дифференциального метода при $\Delta A = 0$. Используется для измерения параметров цепей (R, L, C и др.).

2.3. Метод *противопоставления* – ИВ и образцовая мера одновременно воздействуют на прибор сравнения, который устанавливает соотношение между величинами. Используется для измерения малых напряжений или э.д.с. (компенсационный метод).

2.4. Метод *замещения* – ИВ замещается регулируемой образцовой мерой так, что никаких изменений в состоянии измерительной схемы не происходит. Применяется для измерения L, C и др.

2.5. Метод *совпадений* – разность между ИВ и образцовой мерой измеряется по совпадениям отметок шкал или периодических сигналов. В основном используется для измерения частоты (например, измерение числа оборотов вала при помощи стробоскопа, или измерение линейных размеров штангенприборами, когда добиваются совпадений основной и нониусной отметок шкал).

Погрешности измерений. Обработка результатов измерений

Независимо от точности ИП и методики измерения при практическом осуществлении процесса измерения, измеренная величина отличается от действительной. То есть, *всякому* измерению присуща погрешность.

По способу цифрового выражения различают:

- *Абсолютная погрешность* $\Delta A = A_X - A$,

где A_X – измеренное значение, A – истинное значение измеряемой величины. Имеет размерность измеряемой величины.

- *Относительная погрешность* $\gamma_{отн} = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%$.

На практике $A_X \approx A$, поэтому $\gamma_{отн} \cong \frac{\Delta A}{A_X} \cdot 100\%$. Характеризует точность

(качество) измерений. Выражается в долях измеряемой величины.

- *Приведенная погрешность* $\gamma_{прив} = \frac{\Delta A}{A_{норм}} \cdot 100\%$;

здесь $A_{норм}$ – нормирующее значение (как правило, верхний предел измерения СИ). Для большинства СИ по **приведенной погрешности** устанавливают **класс точности** прибора.

По характеру проявления во времени различают систематические погрешности, случайные погрешности, промахи.

- *Систематические погрешности* – погрешности, которые при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях остаются постоянными или закономерно изменяются. К систематическим относят инструментальные (аппаратурные), методические и субъективные погрешности.

- Инструментальная – погрешность механизма;
- Методическая – погрешность метода измерений;
- Субъективная – погрешность визирования (зависит от состояния экспериментатора и восприятия им показаний СИ).

Систематические погрешности устраняют или уменьшают при помощи поправок.

- *Случайные погрешности* – погрешности, которые при повторных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях изменяются случайным образом по знаку и (или) величине. Точно предсказать причины их появления невозможно. Учитываются при помощи методов математической статистики и теории вероятностей.

В подавляющем большинстве случаев случайные погрешности подчиняются нормальному закону распределения (закон Гаусса, см. рис. 3), т.е. подчиняются следующим закономерностям:

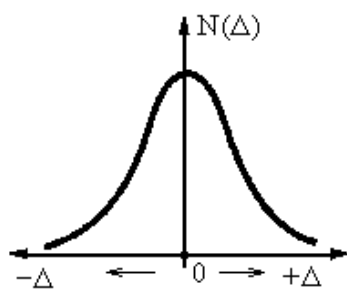


Рисунок 3 - Вид нормального распределения

- 1) равные по абсолютной величине погрешности равновероятны;
- 2) малые по абсолютной величине погрешности более вероятны, чем большие;

3) вероятность появления случайных погрешностей, превосходящих по абсолютной величине некоторое число, практически равна нулю;

4) среднее арифметическое из всех случайных погрешностей ряда измерений стремится к нулю при неограниченном возрастании числа измерений:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$$

Закон Гаусса:

$$N(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}},$$

где $N(\Delta)$ – плотность вероятности распределения случайных погрешностей;

$\Delta = a_i - A$ – случайные погрешности;

a_i – значение измеряемой величины при отсутствии систематических погрешностей;

A – истинное значение измеряемой величины;

e – основание натурального логарифма;

σ – средняя квадратическая погрешность ряда измерений, определяемая по

формуле:
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n}}.$$

- *Промахи* – погрешности, которые явно и резко искажают результаты измерений. Причины: неверный отсчет показаний, аварии в схемах и приборах, и т.п.

По условиям возникновения у средств измерения различают *основную* и *дополнительную* погрешности. Каждое СИ предназначено для работы в определенных условиях, конкретизированных в нормативно-технической документации. При этом отдельно указывают нормальные условия применения средств измерения, т.е. условия, при которых величины, влияющие на погрешности данного СИ, находятся в пределах нормальной области значений и рабочие условия применения – условия работы, при которых значения влияющих величин выходят за пределы нормальных, но находятся в пределах рабочих областей. Погрешность средства измерения, определенная при нормальных условиях, называется *основной*. Погрешность, обусловленную выходом значений влияющих величин за пределы нормальных значений, называют *дополнительной*.

Пример. Амперметр предназначен для измерения переменного тока с номинальной частотой (50 ± 5) Гц. Отклонение частоты за эти пределы приведет к дополнительной погрешности измерения.

По зависимости от значения измеряемой величины различают:

- *Аддитивная погрешность $\Delta_{адд}$* – не зависит от значения измеряемой величины и является постоянной в пределах диапазона измерений (примеры: погрешность нуля, погрешность дискретности (квантования) в цифровых приборах).

- *Мультипликативная погрешность Δ_M* – пропорциональна текущему значению входной величины.

В зависимости от влияния характера изменения измеряемой величины различают:

- *Статическая погрешность* – погрешность СИ, измеряющего величину, постоянную во времени.

- *Динамическая погрешность* – погрешность СИ, измеряющего величину, изменяющуюся в процессе измерения; является следствием инерционных свойств СИ.

Обработка результатов измерений

Сводится к уменьшению случайных погрешностей, т.к. систематические погрешности и промахи можно исключить (они известны).

Основной прием – многократное измерение одной и той же величины, т.е. осреднение.

$$A_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (n - \text{число измерений, } i - \text{номер измерения}).$$

Отклонение результата каждого измерения от среднего значения называется остаточной погрешностью: $V_i = A_i - A_{cp}$. При этом их сумма

$$\sum_{i=1}^n V_i \rightarrow 0.$$

Средняя квадратическая погрешность ряда измерений:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{(n-1)}}.$$

Точность измерения характеризуется вероятной погрешностью ряда измерений:

$$E \approx \frac{2}{3} \sigma.$$

На практике вероятность появления случайной погрешности больше 3σ равна 1/370.

Погрешность 3σ называется наибольшей вероятной погрешностью ряда измерений. Результат измерения представляют в виде:

$$A = A_{cp} \pm \sigma \quad \text{или} \quad A = A_{cp} \pm E.$$

Погрешность результата косвенных измерений:

Измеряемая величина Y связана функционально с одной или несколькими непосредственно измеряемыми величинами X_1, X_2, \dots, X_m , т.е.

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m),$$

поэтому *абсолютная погрешность результата косвенных измерений:*

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1}\right)^2 \Delta X_1^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2}\right)^2 \Delta X_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m}\right)^2 \Delta X_m^2}.$$

Относительная погрешность результата измерения:

$$\begin{aligned} \gamma_Y = \frac{\Delta Y}{Y} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta X_1}{Y}\right)^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X_2}{Y}\right)^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta X_m}{Y}\right)^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\gamma_{X_1}^2 + \gamma_{X_2}^2 + \dots + \gamma_{X_m}^2} \end{aligned}$$

где $\gamma_{X_1}, \gamma_{X_2}, \dots, \gamma_{X_m}$ – частные относительные погрешности косвенного измерения.

Если результаты прямых измерений X_i определены со среднеквадратическими погрешностями σ_{X_i} , то

$$\sigma_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1}\right)^2 \sigma_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2}\right)^2 \sigma_{X_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m}\right)^2 \sigma_{X_m}^2},$$

где $\left(\frac{\partial Y}{\partial X_i}\right) \sigma_{X_i}$ – частные погрешности косвенного измерения.

Суммирование случайных и систематических погрешностей:

Если прибор состоит из N блоков, среднеквадратические погрешности каждого из которых известны (σ), то результирующая погрешность определяется по формуле:

$$\sigma_{рез} = \sqrt{\sum_{K=1}^N \sigma_K^2} \quad (N - \text{число блоков, } K - \text{номер блока}).$$

При наличии систематической погрешности общая погрешность определяется как сумма $\sigma_{общ} = \sigma_{сист} + \sigma_{рез}$.

Результат измерения:

$$A = A_{ср} \pm \sigma_{общ}.$$

Часть 2. Измерительные сигналы

Сигнал – процесс, отражающий состояние системы.

Различают образцовые и измерительные сигналы (С.).

Образцовые С. – это С. с известными характеристиками, с их помощью осуществляют изучение характеристик средств измерения (СИ) по изменению параметров С. на выходе СИ.

Измерительные С. – С., некоторые параметры которых неизвестны. Если параметры сигнала связаны с ИВ, то они *информативны*. Если такой функциональной связи нет – *неинформативны*. Информативные параметры входных измерительных сигналов связаны с ИВ, а информативные параметры выходных сигналов связаны с информативными параметрами входных сигналов.

С. бывают: механические, электрические, тепловые и т.д. в соответствии с физическими процессами. С. также делятся на аналоговые (непрерывные) и дискретные. С. описываются математическими моделями вида $X = F(t, z, \omega, \dots A, B, C, \dots)$. Здесь X – информативный параметр, t, z, ω – независимые аргументы (время, координаты в пространстве, частота), A, B, C – параметры сигнала.

Если модель С. не учитывает случайной компоненты в изучаемом процессе, то она детерминированная. Детерминированная модель используется только для описания образцового сигнала.

Квазидетерминированная модель – модель, в которой один или несколько параметров первоначально неизвестны (например, характеристики помех в сигнале), а случайной компонентой можно пренебречь. Квазидетерминированная модель описывает измерительный сигнал с точностью до неизвестного параметра (например, сигнал $u(t) = U_m \sin \omega t$, где для измерения частоты $f = \omega / 2\pi$ не обязательно амплитуду U_m знать точно).

Модель случайного сигнала используют для описания процессов, закон изменения которых во времени или в пространстве неизвестен и носит случайный характер. Такая модель – это описание статистических характеристик случайного процесса (плотность распределения вероятностей, корреляционные функции и т.п.).

Характеристики электрического сигнала

Электрический сигнал – это изменяющиеся во времени ток или напряжение, несущие в себе информацию.

Сигнал имеет следующие количественные характеристики: мгновенное значение, максимальное значение, минимальное значение, постоянная и переменная составляющие, размах, среднее, средневывпрямленное, среднеквадратическое значения, средняя мощность сигнала, спектр, длительность.

I. Случайный электрический сигнал – сигнал, мгновенные значения которого заранее неизвестны и являются случайными величинами. К основным характеристикам относятся:

а) закон распределения вероятностей – определяет относительную длительность пребывания величины сигнала в определенном интервале уровней;

б) спектральное распределение мощностей сигнала – дает распределение по частотам средней мощности сигнала.

Спектр частот электрического сигнала делят на диапазоны:

Частота	Диапазон
0 – 20 Гц	ИНЧ
20 Гц – 200 кГц	НЧ
(20 Гц – 20 кГц 20 кГц – 200 кГц)	ЗЧ УЗЧ
200 кГц – 30 МГц	ВЧ
30 МГц – 300 МГц	УВЧ
>300 МГц	СВЧ

II. Детерминированный электрический сигнал – задан в виде определенной функции времени. Бывают: периодические, у которых мгновенные значения повторяются через равные промежутки времени T , т.е. $f(t)=f(t+T)$, где T – период, и непериодические.

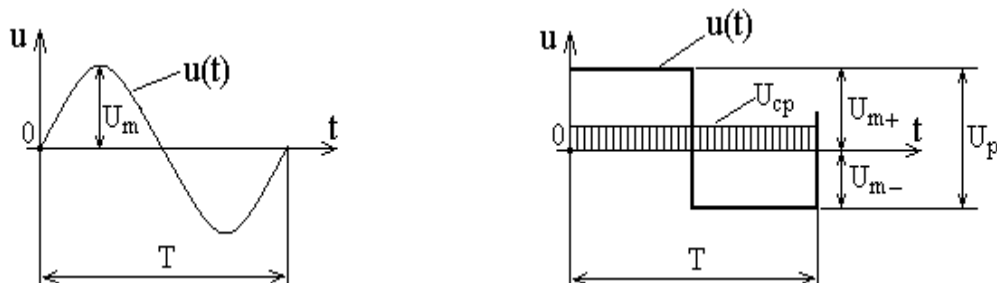


Рис. 4. Периодические сигналы

Характеристики детерминированных периодических сигналов:

- а) мгновенное значение $u(t)$ – значение сигнала в заданный момент времени;
- б) амплитудное значение U_m – наибольшее по абсолютной величине из всех мгновенных значений синусоидального сигнала за период T ;
- в) пиковое значение U_m – наибольшее мгновенное значение несинусоидального сигнала за период или полупериод;
- г) Размах U_p – сумма пиковых значений положительной U_{m+} и отрицательной U_{m-} полувольт несинусоидального сигнала,

$$U_p = U_{m+} + |U_{m-}| \quad (\text{для sin сигнала } = 2U_m)$$

- д) постоянная составляющая (среднее значение за период)

$$U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = U_0 \quad (U_0 - \text{постоянная составляющая})$$

- е) переменная составляющая (разность между сигналом и постоянной составляющей)

$$\tilde{u}(t) = u(t) - U_0.$$

- ж) средневывпрямленное значение (вводится для сигналов, симметричных относительно оси времени)

$$U_{CP.B} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

з) среднеквадратическое значение

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

(для синусоидального сигнала называется *действующим*, или *эффективным значением*).

Для приближенной характеристики формы кривой сигнала используют коэффициенты:

а) коэффициент амплитуды $K_A = U_m/U$ (пикфактор)

б) коэффициент формы $K_\Phi = U/U_{CP.B}$ (формфактор)

в) коэффициент усреднения $K_Y = U_m/U_{CP.B}$

При этом $K_Y = K_A \cdot K_\Phi$. Для синусоидального сигнала $K_A = \sqrt{2}$, $K_\Phi = \pi/2\sqrt{2} = 1,11$, $K_Y = \pi/2$. Для прямоугольного сигнала $K_A = K_\Phi = K_Y = 1$.

Для несинусоидального сигнала:

в) коэффициент коэффициент гармоник $K_G = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$

Здесь $u = u_1 + u_2 + u_3 + \dots = u_1 + \sum_{n=2}^{\infty} u_n$, при этом $u_n = U_{mn} \sin(n\omega t + \psi_n)$; u_1, u_2, u_3 –

гармонические составляющие (гармоники); n – целое число (номер гармоники). Гармоника с $n=1$ называется первой, или основной; гармоники с $n=2, 3, \dots$ называются высшими.

г) коэффициент нелинейных искажений $K_H = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U}$

K_G и K_H показывает удельное содержание высших гармоник в сигнале.

д) действующее значение n -й гармоники относительно первой

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\%$$

Непериодические сигналы (импульсы)

Импульсный сигнал – это сигнал конечной энергии, существенно отличный от нуля в течение ограниченного интервала времени.

Импульсы подразделяют на:

- видеоимпульсы – это однополярные импульсы тока или напряжения, положительной или отрицательной полярности относительно уровня, принятого за нулевой.
- радиоимпульсы – это серия ВЧ-колебаний, образующихся при воздействии видеоимпульсов на колебания высокой частоты.

Далее рассматриваются только видеоимпульсы.

Параметры импульсов.

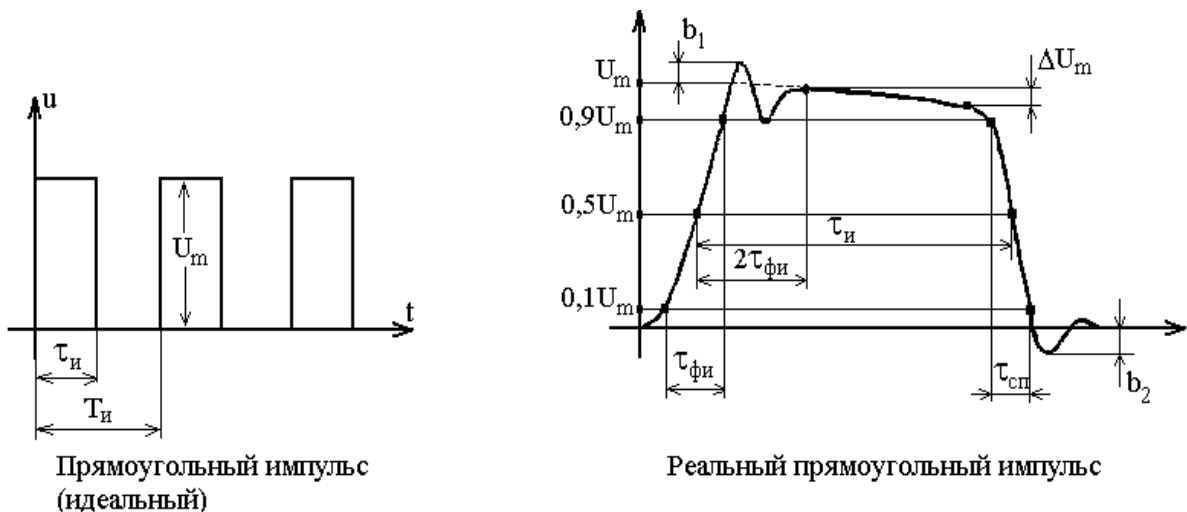


Рисунок 5 - Прямоугольный импульс

(прямоугольный импульс – это импульс, у которого длительность плоской части вершины составляет не менее 0,7 от длительности импульса $\tau_{\text{и}}$)

Параметры: U_m – максимальное значение

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса

$T_{\text{и}}$ – период следования импульсов

$\frac{1}{T_{\text{и}}}$ – частота следования импульсов

$\tau_{\text{фи}}$ – время нарастания фронта импульса

$\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса

$\tau_{\text{сп}}$ – время спада (среза) импульса

ΔU_m – неравномерность вершины

b_1 – выброс на вершине

b_2 – выброс на срезе

Энергия импульса равна $W_{II} = \int_0^{\tau_{II}} u_{II} i_{II} dt$. Кроме того, для характеристики периодической последовательности импульсов используются такие параметры, как скважность $-\frac{T_{II}}{\tau_{II}}$, и коэффициент заполнения $-\frac{\tau_{II}}{T_{II}}$.

Преобразование и обработка измерительных сигналов

Передача информации с помощью сигналов осуществляется посредством *модуляции*, т.е. путем изменения значений параметров сигналов.

При модуляции параметры несущего (вспомогательного) сигнала управляются мгновенными значениями первичного сигнала информации. Несущими бывают:

- постоянный сигнал $z(t) = X_m$ (один информативный параметр – X_m);
- гармонический сигнал $z(t) = X_m \cos(\omega_0 t + \psi)$ (три информативных параметра – X_m, ω_0, ψ);
- периодическая последовательность импульсов (несколько информативных параметров – амплитуда импульсов, частота следования импульсов, длительность импульса, комбинации импульсов и пауз).

Выбор несущего сигнала дает виды модуляции (рис. 6):

- прямая (изменяется амплитуда постоянного сигнала) – ПМ;
- амплитудная (АМ), частотная (ЧМ), фазовая (ФМ) для гармонического несущего сигнала;
- амплитудно-импульсная (АИМ), частотно-импульсная (ЧИМ), время-импульсная (ВИМ), кодоимпульсная (КИМ) для импульсного несущего сигнала.

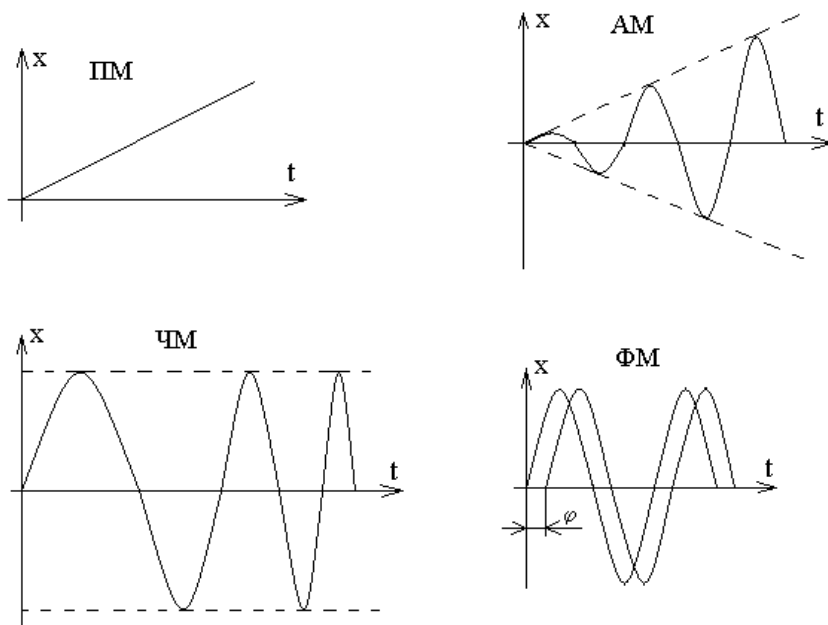
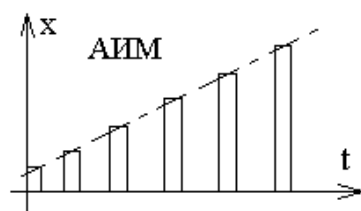
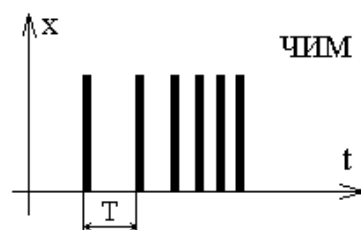


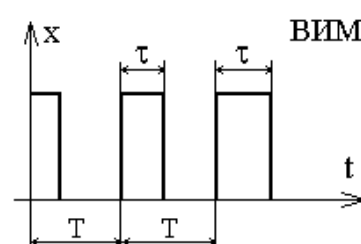
Рисунок 6 - Виды модуляции (начало)



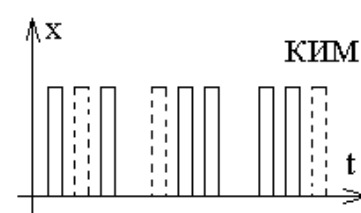
Амплитуда импульса пропорциональна входному сигналу



Входной сигнал определяет частоту следования импульсов (длительность и амплитуда постоянны)



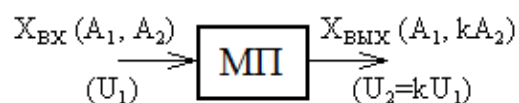
Длительность импульсов пропорциональна входному сигналу (частота следования постоянна)



Комбинация импульсов и пауз в пачке импульсов

Рисунок 6 - Виды модуляции (окончание)

Другой вид преобразования – *масштабирование*:



k - масштабный коэффициент;
 A_2 - информативный параметр
 (обычно - напряжение U , иногда частота сигнала)

МП - масштабный преобразователь

Часть 3. Общие свойства электромеханических измерительных приборов

По *принципу действия* все ИП бывают трех основных типов:

- электромеханические;
- электронные;
- цифровые.

По используемому *методу измерения* ИП бывают:

- ИП непосредственной оценки – здесь мера используется лишь при градуировке;
- ИП сравнения (компараторы) – здесь мера используется в процессе измерения (встроена в прибор).

По *характеру получения информации* ИП бывают:

- только отсчитывающие показания;
- интегрирующие;
- логометры (измеряют отношение двух величин).

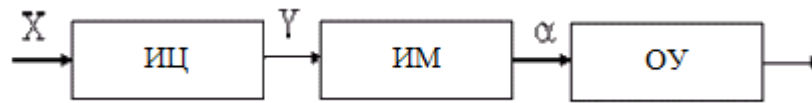
По *способу получения отсчета* ИП бывают:

- с визуальным отсчетом (стрелочные или цифровые);
- регистрирующие (самописцы, печатающие приборы).

В *электромеханических приборах* электромагнитная энергия, подведенная к прибору из измерительной цепи, преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части относительно неподвижной.

Состав электромеханических приборов

Состоят из трех основных блоков:



ИЦ – измерительная цепь, обеспечивает преобразование электрической величины X в промежуточную электрическую величину Y , функционально связанную с величиной X и пригодную для непосредственной обработки измерительным механизмом. Пример ИЦ – делитель напряжения. ИЦ позволяет использовать один и тот же измерительный механизм для измерения величин, меняющихся в широких пределах (пример – шунт), или для измерения разнородных величин (пример – термопара).

ИМ – измерительный механизм, основная часть прибора, предназначенная для преобразования электромагнитной энергии в механическую, энергию углового перемещения α подвижной части.

$$\alpha = f(Y) = F(X)$$

Все угловые перемещения описываются уравнением:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum_{j=1}^n M_j,$$

где J – момент инерции;

α – угол поворота подвижной части ИП;

t – время;

$\sum M$ – сумма моментов, действующих на подвижную часть,

n – число этих моментов,

j – номер момента.

На подвижную часть действуют моменты:

- вращающий $M_{вр} = F(X, \alpha)$, характер зависит от принципа действия ИП;
- противодействующий. Создается при помощи спиральной пружины, $M_{пр} = -W\alpha$, направлен встречно по отношению к $M_{вр}$ (w – удельный момент противодействия на единицу угла закручивания пружины). В *логометрах* создается электромагнитным путем (аналогично $M_{вр}$).

— момент успокоения $M_y = -p \frac{d\alpha}{dt}$, направлен встречно движению и пропорционален скорости отклонения; p – коэффициент успокоения (демпфирования).

Подвижная часть устанавливается в определенное положение (т.е. $\alpha = \text{const}$) при условии

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}.$$

По принципу преобразования электромагнитной энергии в механическую электромеханические ИП разделяются на несколько групп (систем). Основными системами являются: магнитоэлектрическая, электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая и электростатическая.

ОУ – отсчетное устройство. Состоит из указателя, связанного с подвижной частью, и неподвижной шкалы.

Шкала прибора обычно представляет собой пластину, имеющую белую поверхность с черными отметками, соответствующими определенным значениям измеряемой величины. Шкалы бывают равномерные и неравномерные, односторонние и двусторонние.

Указатель представляет собой перемещающуюся над шкалой стрелку, жестко скрепленную с подвижной частью прибора. Применяется также световой способ отсчета, который заключается в следующем: на оси подвижной части закрепляется зеркальце, освещаемое специальным осветителем; луч света, отраженный от зеркальца, попадает на шкалу и фиксируется на ней; при повороте подвижной части световой указатель перемещается по шкале.

Световой отсчет позволяет существенно увеличить чувствительность прибора, во-первых, вследствие того, что угол поворота, отраженного луча вдвое больше угла поворота зеркальца, а, во-вторых, потому, что длину луча можно сделать весьма большой. Кроме того, при световом отсчете уменьшаются масса и особенно, момент инерции подвижной части. Это позволяет расширить пределы измерения в сторону малых величин и улучшает условия успокоения прибора.

Общие механические свойства электромеханических ИП

1. Установка подвижной части. Детали для установки подвижной части должны обеспечивать свободное вращение последней. Используются три способа установки: на кернах, на растяжках, на подвесе.

При установке на кернах ось, вокруг которой вращается подвижная часть, имеет два стальных острия - керны, которыми она опирается на агатовые или корундовые подпятники. Недостатком такой установки является наличие трения в опорах, т.е. между кернами и подпятниками. При установке на растяжках подвижная часть подвешивается между двумя растянутыми ленточками из бронзового сплава. Такой способ крепления свободен от трения в опорах. При установке на подвесе подвижная часть подвешивается на металлической или кварцевой нити. Такой способ крепления применяется в особо чувствительных приборах (рисунок 7).

Наиболее распространена установка на растяжках.

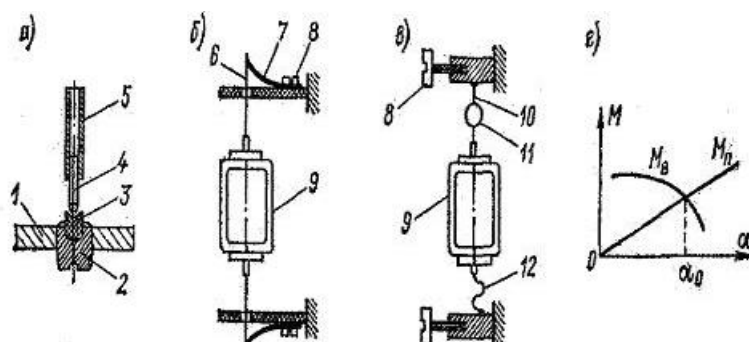


Рисунок 7 - Способы установки подвижной части прибора

а - на оси; б - на растяжках; в - на подвесе; г - зависимость вращающего и противодействующего моментов от угла поворота подвижной части

- (1 - корпус;
- 2 - регулировочный винт;
- 3 - подпятник;
- 4 - керн;
- 5 - ось;
- 6 - растяжка;
- 7 - пружина;
- 8 - контактный винт, крепящий;
- 9 - рамка;
- 10 - подвес;
- 11 - зеркало;
- 12 - безмоментная лента)

2. Вращающий и противодействующий моменты. Вращающий момент является производной электромагнитной энергии $W_{эм}$:

$$M_{вр} = \frac{dW_{эм}}{d\alpha} = Y^n \cdot f(\alpha),$$

причем показатель степени n зависит от системы ИП.

Равновесие подвижной части наступает при $M_{вр} = M_n$ (см. рис. 7, г), при этом выражение вида $\alpha = F(X) = \Phi(X)$ называется *уравнением шкалы прибора*.

3. Постоянная прибора и его чувствительность.

Постоянная прибора $C = \frac{dX}{d\alpha}$.

Чувствительность $S = 1/C$.

Порог чувствительности (или *пороговая чувствительность*) – минимальное изменение измеряемой величины, которое может быть зарегистрировано прибором. Чем больше чувствительность, тем ниже ее порог.

4. Цена деления – это значение ИВ, соответствующее одному делению шкалы.

5. Успокоение (демпфирование) подвижной части обеспечивается успокоителями, наиболее распространенными из которых являются магнитоиндукционный (рисунок 8, а) и воздушный (рисунок 8, б).

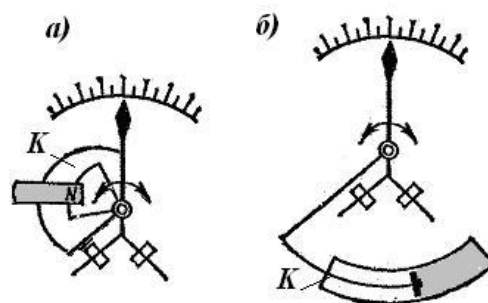


Рисунок 8 - Успокоители

Общие электротехнические свойства ИП

1. Собственное потребление энергии. Потребление прибором энергии из измерительной цепи, необходимой для его функционирования, приводит к искажению цепи. Поэтому необходимо соотносить величины собственного потребления энергии прибором и мощности цепи (во избежание существенных искажений цепи, приводящих к некорректным результатам измерений). Собственное потребление лежит в пределах ($10^{-6} \div 10^0$) Вт. В маломощных цепях используют электронные и цифровые приборы, имеющие отдельный источник питания.

2. Влияние внешних электромагнитных полей. Защитой от ВЭМП является экранирование. По степени защищенности от ВЭМП ИП делятся на 2 категории: 1 – менее чувствительные; 2 – более чувствительные.

3. Влияние изменений температуры. Для исключения температурных влияний используют специальные схемы термокомпенсации (например, на основе термисторов).

4. Перегрузочная способность. Возможные перегрузки указываются в документации на ИП.

Классы точности электромеханических ИП

Под *классом точности* понимают обобщенную характеристику точности СИ данного типа, определяемую пределами допускаемой основной погрешности.

Для ИП вводится понятие *максимальной абсолютной погрешности* $\Delta A' = A_x - A_0$ - это наибольшее значение абсолютной погрешности ИП, полученное при его поверке (здесь A_x – измеренное значение, A_0 – истинное значение ИВ). Исходя из величины $\Delta A'$ устанавливают величину основной погрешности (приведенной относительной погрешности):

$$\gamma_{np} = \frac{\Delta A''}{A_M} \cdot 100\% ,$$



при этом A_M – верхний предел измерения прибора.

Величина γ_{np} , установленная в нормальных условиях работы ИП, определяет его класс точности. Для электромеханических ИП установлено 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.









Класс точности указывается на шкале или корпусе прибора.

Условные обозначения на шкалах электромеханических ИП

1. Принцип действия прибора

Условное обозначение		Вид измерительной системы
Прибор	Логометр	
		Магнитоэлектрическая
		Электромагнитная
		Электродинамическая
		Ферродинамическая
		Индукционная
		Электростатическая
		Тепловая с проволочным нагревателем
		Тепловая с биметаллической пластиной

2. Буквенные обозначения приборов

Обозначение	Наименование прибора	Физическая величина
	Амперметр μA- микроамперметр mA- миллиамперметр kA - килоамперметр MA- мегаамперметр	Сила тока
	Вольтметр mV- милливольтметр kV - киловольтметр MV- мегавольтметр	Напряжение
	Омметр kΩ- килоомметр MΩ-мегаомметр	Сопротивление
	Ваттметр kW- киловаттметр MW- мегаваттметр	Мощность переменного и постоянного тока
	Герцметр (частотомер) kHz -килогерцметр MHz-мегагерцметр	Частота
	Фазометр	Коэффициент мощности
	Счетчик	Электрическая энергия
	Мультиметр (тестер)	Сила тока Напряжение Сопротивление

3. Род тока

Условное обозначение	Вид измеряемого тока
—	Постоянный
~	Переменный
~	Постоянный, переменный
≈	Переменный трехфазный
~ 400	Переменный частотой 400 Гц

4. Рабочее положение прибора

Условное обозначение	Положение прибора при измерениях
┌	горизонтальное
└	вертикальное
↙ 30°	наклонное (например, под углом 30°)

Классификация электронных и цифровых измерительных приборов

Существует 4 группы таких ИП:

1. *Измерительные генераторы* – это источники сигналов различной формы и частоты;

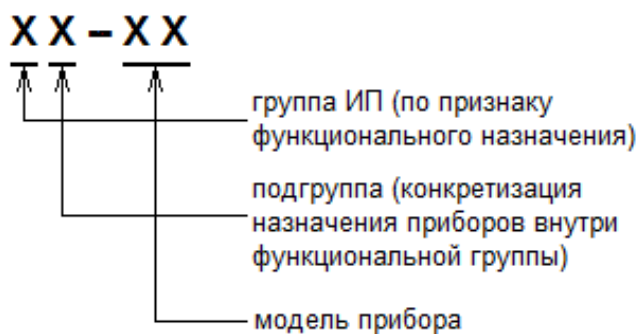
2. *Приборы для измерения параметров и характеристик сигнала* – осциллографы, вольтметры, частотомеры, фазометры, анализаторы спектра, измерители нелинейных искажений, и т.д. Эти ИП используют для измерения почти всех электрических величин.

3. *Приборы для измерения параметров и характеристик элементов различных схем* – измерители емкости, индуктивности, добротности, сопротивления, параметров полупроводниковых приборов, интегральных схем, и т.д.

4. *Элементы измерительных схем* – аттенюаторы (делители), фазовращатели, и т.д.

Обозначения электронных и цифровых измерительных приборов

Структура обозначения таких приборов:



Основные группы и подгруппы:

А – приборы для измерения тока

— А1 – образцовые приборы

— А2 – амперметры постоянного тока

— А3 – амперметры переменного тока

— А7 – универсальные амперметры

— А9 – преобразователи тока

В – приборы для измерения напряжения

- В1 – образцовые приборы
- В2 – вольтметры постоянного тока
- В3 – вольтметры переменного тока
- В4 – вольтметры импульсного тока
- В5 – фазочувствительные вольтметры, или векторометры
- В6 – селективные вольтметры
- В7 – универсальные вольтметры
- В8 – измерители отношений или разности напряжений
- В9 – преобразователи напряжения

Е – приборы для измерения параметров элементов в цепях с сосредоточенными постоянными

- Е1 – образцовые приборы
- Е2 – измерители полных сопротивлений или полных проводимостей
- Е3 – измерители индуктивностей
- Е4 – измерители добротности
- Е6 – измерители сопротивлений
- Е7 – универсальные измерители параметров (R, L, C)
- Е8 – измерители емкостей
- Е9 – преобразователи параметров элементов цепей

М – приборы для измерения мощности

- М1 – образцовые приборы
- М2 – ваттметры проходящей мощности
- М3 – ваттметры поглощаемой мощности
- М5 – преобразователи мощности

Р – приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными

Ч – приборы для измерения частоты и времени

- Ч1 – образцовые приборы
- Ч2 – частотомеры резонансные
- Ч3 – частотомеры электронно-счетные
- Ч4 – частотомеры ёмкостные
- Ч5 – синхронизаторы и преобразователи частоты сигнала
- Ч6 – делители, умножители и синтезаторы частоты
- Ч7 – приёмники сигналов времени, компараторы частотные, временные
- Ч9 – преобразователи частоты

Ф – приборы для измерения разности фаз и времени запаздывания

С – осциллографы

- С1 – универсальные осциллографы
- С2 – измерители коэффициента амплитудной модуляции (модулометры)
- С3 – измерители девиации частоты
- С4 – анализаторы спектра
- С6 – измерители коэффициента нелинейных искажений
- С7 – осциллографы скоростные стробоскопические
- С8 – запоминающие осциллографы
- С9 – цифровые осциллографы, специальные осциллографы

Х – приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств

- Х1 – приборы для исследования АЧХ
- Х3 – приборы для исследования ФЧХ
- Х4 – приборы для исследования амплитудных характеристик

И – приборы для импульсных измерений

- И3 – счетчики числа импульсов
- И4 – измерители параметров импульсов

У – усилители измерительные

Г – генераторы измерительные

— Г3 – генераторы сигналов низкочастотные

— Г4 – генераторы сигналов высокочастотные

— Г5 – генераторы импульсов

— Г6 – генераторы сигналов специальной формы

Д – аттенюаторы и приборы для измерения ослаблений

К – комплексные измерительные устройства

Л – измерители параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов

Ш – приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов

Э – измерительные устройства волноводных трактов

Я – блоки радиоизмерительных устройств

— Я3 – блоки для измерения частоты и времени

— Я7 – блоки измерительных генераторов сигналов различных форм

— Я8 – блоки источников питания

Б – источники питания

— Б2 – источники переменного тока

— Б4 – источники калиброванного напряжения и тока

— Б5 – источники постоянного тока

— Б7 – универсальные источники

Часть 4. Электромеханические измерительные приборы

Приборы магнитоэлектрической системы

На рисунке 9 показана конструкция прибора с подвижной катушкой. Постоянный магнит 1, магнитопровод с полюсными наконечниками 2 и неподвижный сердечник 3 составляют магнитную систему механизма. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником создается сильное равномерное радиальное магнитное поле, в котором находится подвижная прямоугольная катушка 9,

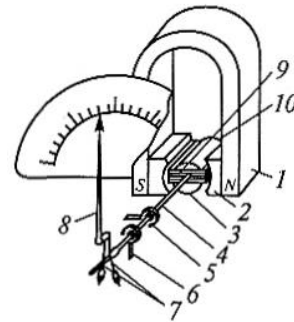


Рисунок 9 -

Магнитоэлектрический ИМ

намотанная медным или алюминиевым проводом на алюминиевый каркас (возможно бескаркасное исполнение рамки). Катушка (рамка) может поворачиваться в зазоре на полуосях 4 и 10. Спиральные пружины 5 и 6 создают противодействующий момент и используются для подачи измеряемого тока от выходных зажимов прибора в рамку (механические и электрические соединения на рисунке не показаны). Рамка жестко соединена со стрелкой 8. Для балансировки подвижной части имеются передвигающиеся грузики 7.

По катушке протекает измеряемый ток, при взаимодействии которого с полем магнита создается вращающий момент.

Электромагнитная энергия в контуре с током I , находящимся в поле магнита, равна $W_{эм} = I\psi$ (ψ – потокосцепление катушки). Тогда момент

$$M_{вр} = I \frac{d\psi}{d\alpha}.$$

Полное изменение потокосцепления с рамкой через конструктивные параметры рамки

$$d\psi = BSwd\alpha,$$

где S – площадь рамки,
 B – индукция в зазоре,
 w – число витков рамки.

Поэтому $M_{вр} = BS w I$.

Противодействующий момент $M_{пр} = W\alpha$, и из условия равенства моментов получим уравнение шкалы прибора:

$$\alpha = \frac{BS_w}{W} I = S_I \cdot I,$$

где S_I – чувствительность прибора по току.

Достоинства: высокая точность (к.т. 0,05, 0,1, 0,5); минимальное влияние внешних электромагнитных полей; возможность получения многопредельных приборов; высокая чувствительность; малое собственное потребление энергии; линейность шкалы ($\alpha \sim I^1$).

Недостатки: неуниверсальны (без дополнительных преобразователей могут использоваться только в цепях постоянного тока); малая перегрузочная способность; высокая сложность и стоимость.

Измерение тока ПМЭС. Прямое включение возможно на токи до 50 мА. Для измерения токов, превышающих эту величину, необходимо использовать шунты.

Шунт – это сопротивление небольшого номинала специального исполнения, являющееся простейшим преобразователем тока в пропорциональное ему напряжение, используемое для расширения пределов измерения амперметров на постоянном токе (рис. 10).

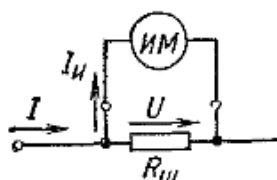


Рис. 10.

Подключение ПМЭС
через шунт

Ток I_u , протекающий через измерительный механизм, связан с измеряемым током I зависимостью $I_u = I(R_{ш}/R_{ш} + R_u)$, где R_u – сопротивление измерительного механизма.

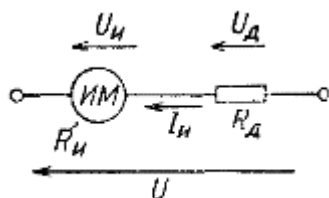
Если необходимо, чтобы ток I_u был в n раз меньше тока I , то сопротивление шунта должно быть:

$$R_{ш} = R_u / (n - 1),$$

где $n = I/I_u$ – коэффициент шунтирования.

Получение многопредельных приборов возможно применением магазина шунтов с переключателем.

Измерение напряжение ПМЭС. Для измерения напряжения последовательно с ИМ включается добавочное сопротивление (рис. 11). Добавочные резисторы являются измерительными преобразователями напряжения в ток, а на значение тока непосредственно реагируют измерительные механизмы вольтметров.



Ток I_u в цепи, состоящий из измерительного механизма с сопротивлением R_u и добавочного резистора с сопротивлением R_d , составит

$$I_u = U / (R_u + R_d), \text{ где } U - \text{измеряемое напряжение.}$$

Рисунок 11 - Включение

ПМЭС с добавочным
сопротивлением

Если вольтметр имеет предел измерения $U_{ном}$ и сопротивление измерительного механизма R_u и при помощи добавочного резистора R_d надо

расширить предел измерения в n раз, то, учитывая постоянство тока I_u , протекающего через измерительный механизм вольтметра, можно записать:

$$U_{ном} / R_u = n U_{ном} / (R_u + R_d), \text{ откуда}$$

$$R_d = R_u(n - 1).$$

Логометры. Логометры – электромеханические приборы, измеряющие отношение двух электрических величин, обычно двух токов: $\alpha = f(I_1 / I_2)$, что позволяет сделать их показания независимыми в известных пределах от напряжения источника питания. В логометрах вращающий и противодействующий моменты создаются электрическим путем и направлены навстречу друг другу. На рисунок 12 приведена схема устройства магнитоэлектрического логометра.

В поле постоянного магнита помещена подвижная часть, состоящая из двух жестко закрепленных под определенным углом рамок. Особой формой полюсных наконечников и сердечника, находящегося между ними, искусственно создается в зазоре между ними неравномерное магнитное поле постоянного магнита.

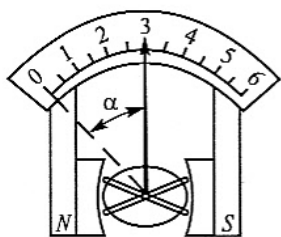


Рисунок 12 - Устройство магнитоэлектрического

логометра

Токи к рамкам подводятся через безмоментные токоподводы, не создающие противодействующего момента. Направления токов в рамках логометра выбираются так, чтобы моменты $M_{\text{вп}}$ и $M_{\text{нр}}$ были направлены в разные стороны. Тогда в общем виде можно записать:

$$M_{\text{вп}} = I_1 f_1(\alpha); M_{\text{нр}} = I_2 f_2(\alpha),$$

где I_1, I_2 – токи в рамках. Из условия равновесия моментов получим $I_1 f_1(\alpha) = I_2 f_2(\alpha)$, откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f(\alpha), \text{ или } \alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Приборы электромагнитной системы

В ПЭМС для перемещения подвижной части используется энергия магнитного поля системы, состоящей из катушки с измеряемым током и одного или нескольких ферромагнитных сердечников (рис. 13).

Сердечник 7 из пермаллоя под действием сил поля втягивается в узкий воздушный зазор катушки 5 с обмоткой из медного провода. Ось 3 сердечника 1 со стрелкой 6, спиральной пружиной 4 и подвижной частью успокоителя 2 крепится на опорах или растяжках.

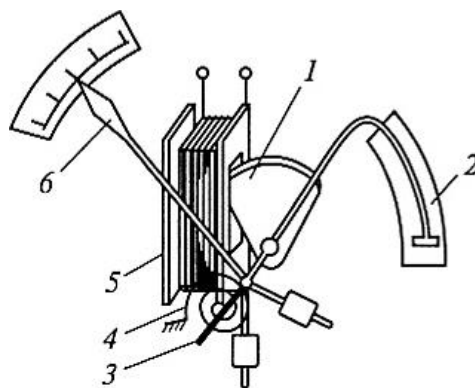


Рисунок 13 - Электромагнитный ИМ

Энергия поля катушки с током I выражается формулой $W_{\text{эм}} = LI^2/2$, поэтому вращающий момент

$$M_{\text{вп}} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Из условия равенства вращающего и противодействующего моментов получим уравнение шкалы прибора

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

где W – удельный противодействующий момент пружины.

Из последнего уравнения видно, что шкала прибора квадратичная. Конструктивно добиваются равномерности шкалы, начиная с 1/5 части верхнего предела измерения. Так как $\alpha \sim I^2$, прибор пригоден для измерения как постоянного, так и переменного тока. При измерении переменного тока показания прибора пропорциональны действующему значению тока.

Достоинства: универсальность; хорошая перегрузочная способность; простота конструкции и высокая надежность; возможность выполнения измерительного механизма на значительные токи (до 300 А) и напряжения (до 60 В) при прямом включении.

Недостатки: неравномерность шкалы; большое собственное потребление энергии (3 Вт на каждые 20 В для вольтметров и 2 Вт на каждые 30 А для амперметров, поэтому ПЭМС в маломощных цепях не применяют); влияние внешних магнитных полей (необходим экран); относительно низкая точность (к.т. обычно 1,5, 2,5, 4,0).

Электромагнитный логометр. Такой прибор содержит две катушки, причём сердечники обеих катушек имеют общую ось. Токи в катушках направлены так, что моменты, создаваемые ими, направлены встречно – следовательно, один момент является вращающим, другой противодействующим (природа же моментов одинакова).

Энергия катушек определяется выражениями $W_1 = \frac{L_1 I_1^2}{2}, W_2 = \frac{L_2 I_2^2}{2}$, поэтому моменты будут равны:

$$M_1 = \frac{I_1^2}{2} \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} = I_1^2 \cdot f_1(\alpha), M_2 = \frac{I_2^2}{2} \cdot \frac{dL_2}{d\alpha} = I_2^2 \cdot f_2(\alpha).$$

Прибор уравновешен при условии $M_1 = M_2$, т.е. $I_1^2 \cdot f_1(\alpha) = I_2^2 \cdot f_2(\alpha)$. Отсюда получим уравнение шкалы прибора:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1^2}{I_2^2}\right) = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2,$$

т.е. прибор измеряет отношение двух величин.

Пример использования электромагнитного логометра – **фарадометр** (измеритель ёмкости), схема которого приведена на рисунок 14.

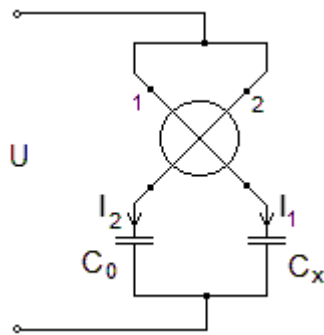


Рисунок 14 - Фарадометр

Здесь C_0 – известная ёмкость, C_x – измеряемая (неизвестная) ёмкость.

Токи в цепях катушек равны:

$$I_1 = U\omega C_x, I_2 = U\omega C_0.$$

Следовательно, зависимость для α будет иметь вид

$$\alpha = f\left(\frac{U\omega C_x}{U\omega C_0}\right)^2 = f\left(\frac{C_x}{C_0}\right)^2.$$

Таким образом, установлено, что угол поворота подвижной части α зависит от C_x .

Приборы электродинамической системы

В таких приборах для перемещения подвижной части используется энергия системы, состоящей из подвижной и неподвижной катушек с токами. Неподвижная часть может иметь одну, чаще две катушки, соединенные между собой параллельно или последовательно, намотанные медным проводом, внутри которых располагается подвижная катушка, обычно бескаркасная. Для ее включения в цепь измеряемого тока используются пружинки или растяжки. Успокоение подвижной части – воздушное или магнитоиндукционное.

Внутри неподвижной катушки 1 (рис. 15) вращается укрепленная на оси подвижная катушка 2. Ток к ней подводится по спиральным токоподводящим пружинам, служащим одновременно для создания противодействующего момента.

Электромагнитная энергия системы двух катушек с токами I_1 и I_2

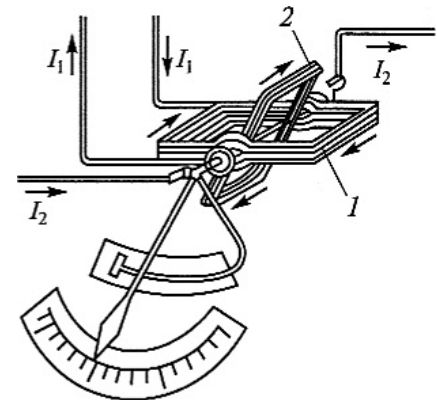


Рисунок 15 -
Электродинамический ИМ

$$W_{\text{эм}} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2 ,$$

где M – коэффициент взаимной индукции катушек.

Вращающий момент

$$M_{\text{вп}} = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}$$

(индуктивности катушек L_1 и L_2 не зависят от положения в пространстве), он зависит от токов в подвижной и неподвижной катушках. После приравнивания, вращающего и противодействующего моментов получаем уравнение шкалы прибора

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} .$$

Учитывая, что взаимная индуктивность M катушек зависит от расположения подвижной катушки относительно неподвижной, можно представить уравнение в общем виде:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 f(\alpha)$$

Это уравнение действительно для случая работы ПЭДС на постоянном токе. На переменном токе показания ПЭДС зависят от произведения действующих значений токов I_1 и I_2 и от сдвига по фазе между этими токами:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cdot \cos \psi \cdot f(\alpha)$$

При последовательном соединении катушек $I_1=I_2=I$, $\psi=0$, $\cos \psi=1$ и уравнение примет вид:

$$\alpha = \frac{1}{W} I^2 \cdot f(\alpha)$$

Достоинства: универсальность; высокая точность (к.т. 0,1, 0,2, 0,5); частотный диапазон до 40 кГц; диапазон измерений (при прямом включении) на постоянном токе 0,015...10 А, на переменном токе 0,005...200 А, измерения постоянного напряжения 1,5...600 В.

Недостатки: большое собственное потребление энергии; неравномерная шкала; невысокая чувствительность; малая перегрузочная способность; сложная конструкция и высокая стоимость; зависимость от внешних электромагнитных полей (необходим экран).

Применение приборов электродинамической системы

I. Измерение напряжения. Катушки ИМ включаются последовательно (рисунок 16).

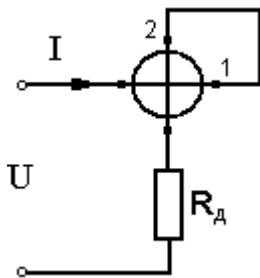


Рисунок 16 -
Измерение
напряжения ПЭДС

1 – неподвижная катушка (токовая цепь);
2 – подвижная катушка (цепь напряжения).

Уравнение шкалы имеет вид $\alpha = \frac{1}{W} I^2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}$,

I – ток через прибор, он равен

$$I = \frac{U}{R_{01} + R_{02} + R_0}$$

(R_{01} – сопротивление неподвижной катушки,
 R_{02} – сопротивление подвижной катушки,
 R_0 – добавочное сопротивление),
из чего следует, что $\alpha = f(U^2)$.

II. Измерение тока. Катушки ИМ включаются последовательно. Для расширения пределов измерения используются: на постоянном токе – шунты, на переменном токе – измерительные трансформаторы тока.

III. Измерение мощности (ваттметр). Схема включения прибора и векторная диаграмма (для цепи переменного тока) представлены на рис. 17.

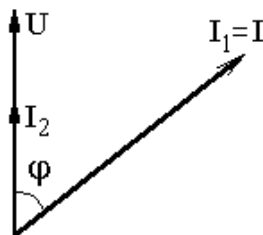
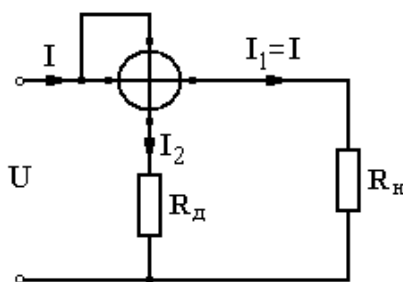


Рисунок 17 - Измерение
мощности ПЭДС

1) Для цепи постоянного тока

$$M_{ep} = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} = \frac{UI}{R_{02} + R_0} \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad M_{np} = W\alpha,$$

уравнение шкалы $\alpha = P \frac{1}{WR} \frac{dM_{12}}{d\alpha} = f(P)$, шкала

прибора линейная.

2) Для цепи однофазного переменного тока (см. векторную диаграмму на рис. 17)

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{UI \cos \varphi}{R_{02} + R_0} \frac{dM_{12}}{d\alpha} = f(P). \quad \text{Конструктивными}$$

мероприятиями добиваются постоянства

коэффициента $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$, что позволяет получить линейную шкалу.

В реальных условиях подвижная катушка обладает индуктивностью, поэтому векторная диаграмма имеет вид, представленный на рис. 18.

С учетом индуктивности уравнение шкалы примет вид:

$$\alpha = \frac{1}{W} \cdot K \cdot UI \cos(\varphi - \delta)$$

Появление δ , не равного нулю, вносит в результат измерения погрешность. Для компенсации этой погрешности в прибор вводят компенсирующую ёмкость, включаемую последовательно с подвижной катушкой.

IV. Измерение реактивной мощности. Схема включения прибора и векторная диаграмма представлены на рис. 19.

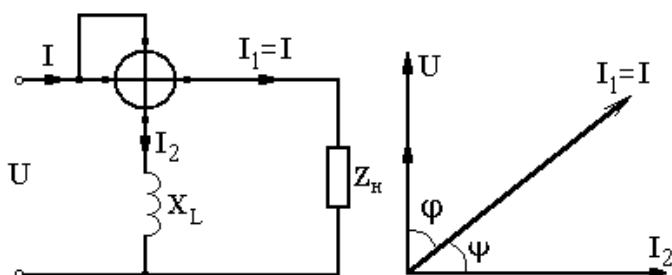


Рисунок 19 - Измерение реактивной мощности ПЭДС

Как известно, реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$.

Токи в катушках прибора $I_1 = I$, $I_2 = U/X_L$ (полагаем, что $R_{02} \approx 0$).

Угол $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$. Тогда

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I \frac{U}{X_L} \cos \psi = \\ &= \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{UI \sin \varphi}{X_L} = K \cdot Q \end{aligned}$$

V. Подключение ваттметра к однофазной цепи. Включение электромеханических ваттметров непосредственно в электрическую цепь допустимо при токах нагрузки, не превышающих 10...20 А, и напряжениях до 600 В. Мощность при больших токах нагрузки и в цепях высокого напряжения измеряется ваттметром с измерительными трансформаторами тока ТА и напряжения TV (рисунок 20).

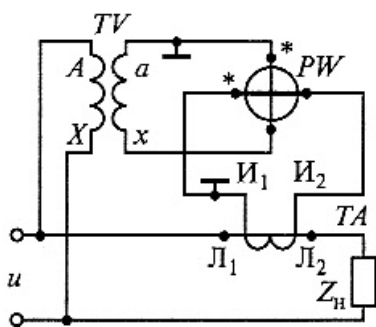


Рисунок 20 - Включение ваттметра
через измерительные
трансформаторы

На рисунке обозначены:

A, X – начало и конец первичной обмотки, a, x – начало и конец вторичной обмотки трансформатора напряжения;

L_1, L_2 – начало и конец первичной обмотки, I_1, I_2 – начало и конец вторичной обмотки трансформатора тока.

Если коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения не учтены при градуировке ваттметра, то

показания прибора следует умножать на эти коэффициенты для получения верного результата измерения.

VI. Измерение мощности в трехфазных цепях. В зависимости от характера нагрузки и разновидности трехфазной сети используют различные способы измерения мощности.

1) *Метод одного прибора* – используется в трехпроводных симметричных системах с равномерной нагрузкой фаз, одинаковыми углами сдвига по фазе между векторами U и I и с полной симметрией напряжений (рисунок 21). На рисунке 21, а нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна. На рисунок 21, б нагрузка соединена треугольником и ваттметр включен в фазу. На рисунке 21, в нагрузка соединена треугольником с искусственной нулевой точкой. Искусственная нулевая точка создается с помощью двух резисторов, каждый из которых имеет такое же сопротивление, как и цепь обмотки напряжения ваттметра.

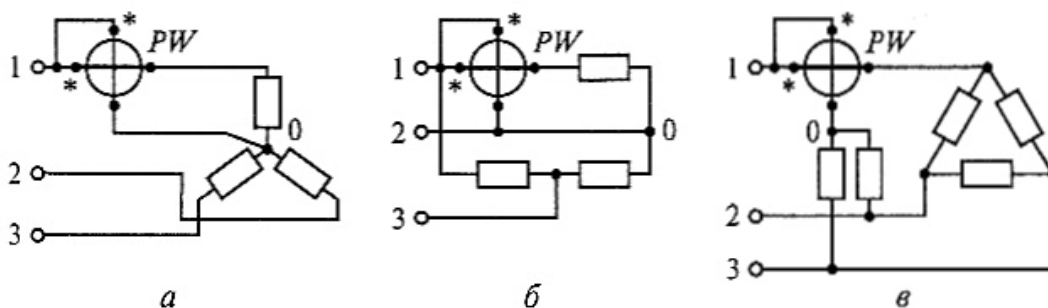


Рисунок 21 - Измерение мощности методом одного прибора

Показания ваттметра будут соответствовать мощности одной фазы, а мощность трехфазной сети во всех трех случаях включения прибора будет равна утроенному показанию прибора.

2) *Метод двух приборов* – применяют в трехфазной трехпроводной цепи независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. Токовые обмотки ваттметров включаются в любые две фазы, а обмотки напряжения — на линейные напряжения (рисунок 22).

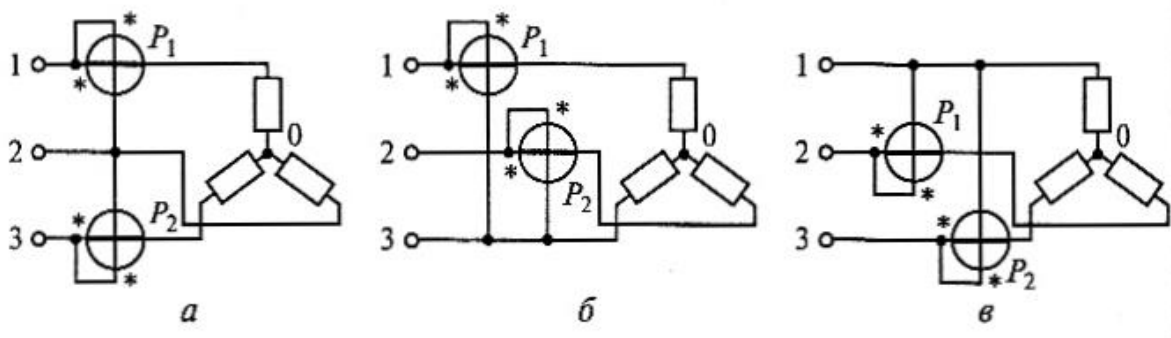
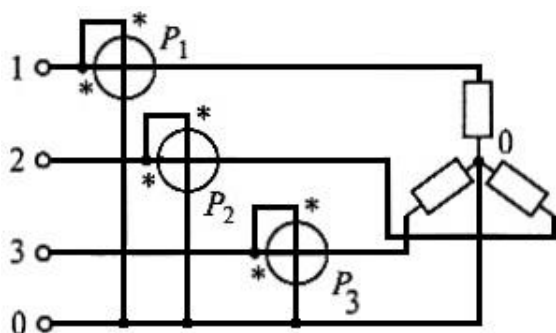


Рисунок 22 - Включение двух ваттметров:

- а – в фазы 1 и 3;
- б – в фазы 1 и 2;
- в – в фазы 2 и 3

Полная мощность может быть выражена в виде суммы показаний двух ваттметров $P=P_1+P_2$ (вне зависимости от положения ваттметров в цепи, варианты см. на рисунке 22).

3) *Метод трех приборов* – применяется в четырехпроводных несимметричных системах (рис. 23).



В этом случае общая мощность при наличии нулевого провода будет равна арифметической сумме показаний трех ваттметров $P=P_1+P_2+P_3$.

Рисунок 23 - Измерение мощности методом трех приборов

VII. Измерение фазы (электродинамический фазометр). Схема и векторная диаграмма прибора даны на рисунок 24.

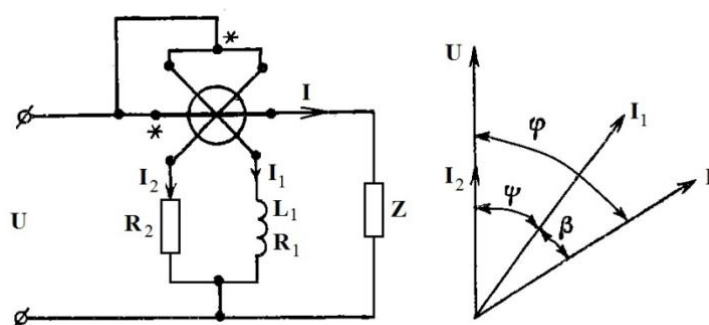


Рис. 24. Электродинамический фазометр

Вращающий и противодействующий моменты направлены навстречу друг другу: $M_{\text{вп}} = k_1 \cdot I \cdot I_1 \cdot \cos \beta \cdot \frac{dM_1}{d\alpha}$, $M_{\text{пр}} = k_2 \cdot I \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \cdot \frac{dM_2}{d\alpha}$, и из условия их равенства получаем

$$\frac{k_1 \cdot I \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi - \psi)}{k_2 \cdot I \cdot I_2 \cdot \cos \varphi} = \frac{dM_1/d\alpha}{dM_2/d\alpha}.$$

Если ток в первой катушке $I_1 = U/z_1$, а во второй $I_2 = U/z_2$, то $\alpha = f(\varphi)$ и не зависит ни от тока нагрузки, ни от напряжения сети. Линейности шкалы добиваются конструктивными мероприятиями.

VIII. Измерение частоты (электродинамический частотомер). Здесь также используется логометр (рисунок 25).

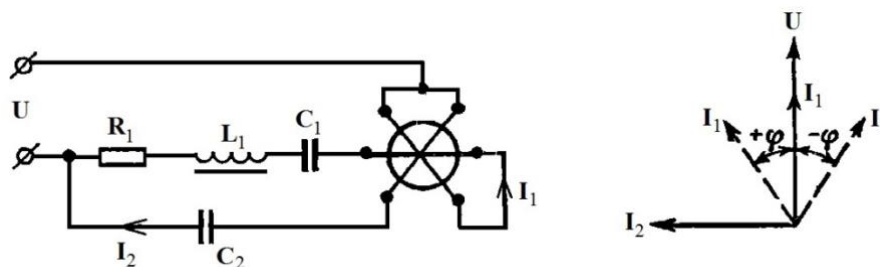


Рисунок 25 - Электродинамический частотомер

Ёмкость C_2 подбирается так, чтобы обеспечить фазовый сдвиг между U и I_2 , равный 90° . Величины R_1 , L_1 , C_1 подбираются так, чтобы имел место резонанс напряжений на частоте, равной среднему значению измеряемого диапазона

(обычно эта величина равна 50 Гц). На подвижную часть действуют моменты, направленные навстречу друг другу, которые могут быть представлены так:
 $M_1 = k_1 I_1^2 F_1(\alpha), M_2 = k_2 I_1 I_2 \cos(I_1, I_2) F_2(\alpha).$

При средней частоте (при резонансе) $\varphi=0$, $\cos(I_1, I_2)=\cos 90^\circ=0$, $M_2=0$, и под действием M_1 подвижная часть повернется до положения, при котором $M_1=M_2=0$. При отклонении частоты от резонансной появляется угол $\varphi \neq 0$ и подвижная часть отклоняется на угол, пропорциональный отклонению частоты от резонансной, т.е. равенство моментов наступит при другом положении подвижной части. В этом приборе $\alpha=F(f)$.

Приборы ферродинамической системы

Отличаются от ПЭДС тем, что неподвижная катушка расположена на магнитопроводе из ферромагнитного материала (см. рис. 26).

При прохождении измеряемого тока по катушкам в результате взаимодействия магнитного поля подвижной катушки с магнитным полем тока неподвижной катушки создается вращающий момент. Подвижная катушка стремится занять положение, когда магнитные поля катушек совпадают.

Это приводит к значительному росту $M_{вр}$, а также к уменьшению влияния внешних электромагнитных полей. Однако из-за потерь на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе точность таких приборов снижается.

Достоинства: отсутствие влияния внешних полей; малая чувствительность к тряске и вибрациям.

Недостатки: сравнительно низкая точность (к.т. 1,0, 1,5, 2,5); небольшой частотный диапазон (до 1,5 кГц).

Применяются в основном в цепях переменного тока для измерения тока, напряжения, мощности, фазы, часто в качестве щитовых приборов. Значительный вращающий момент позволяет использовать такие ИМ и в самописцах.

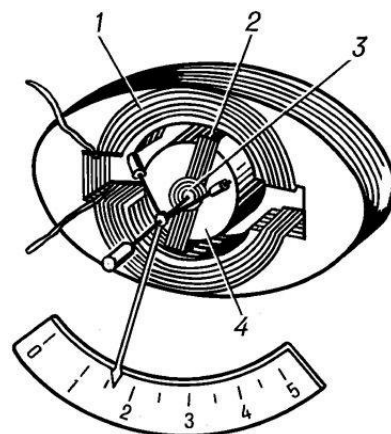


Рисунок 26 - Ферродинамический ИМ:

- 1 – неподвижная катушка на магнитопроводе;
- 2 – подвижная катушка;
- 3 – пружина;
- 4 – сердечник подвижной катушки

Приборы индукционной системы. Счетчик электроэнергии

Устройство и принцип работы. Действие индукционного измерительного механизма основано на взаимодействии магнитных потоков с токами, наводимыми в алюминиевом диске за счет специальной конфигурации магнитной системы (см. рис. 27).

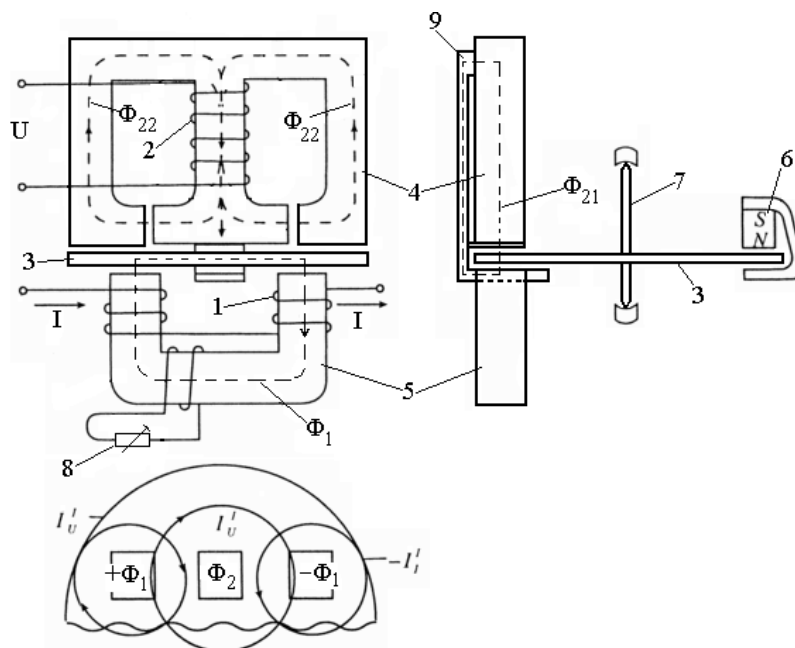


Рисунок 27 - Конструкция счетчика электроэнергии

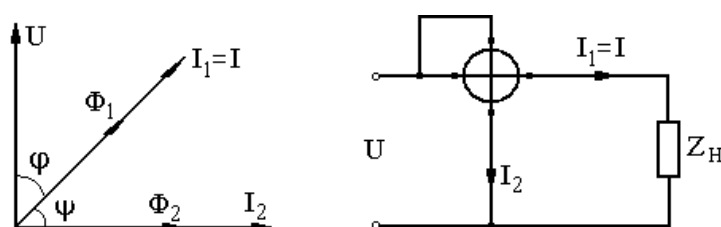


Рисунок 28 - Векторная диаграмма и принципиальная схема включения

На рисунках 27 и 28 обозначены:

- 1 – токовая обмотка,
- 2 – обмотка напряжения,
- 3 – диск,
- 4 – магнитопровод обмотки напряжения,
- 5 – магнитопровод токовой обмотки,
- 6 – постоянный магнит, создающий противодействующий момент,
- 7 – ось диска,
- 8 – сопротивление для регулирования угла фазового сдвига между магнитными потоками обмоток тока и напряжения,
- 9 – ярмо (магнитопровод).

Электромагниты 1 и 2 создают переменные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 с углом фазового сдвига между ними 90° , направленные перпендикулярно плоскости диска.

Потоки Φ_1 и Φ_2 , пронизывая диск, индуцируют в нем вихревые токи I'_I и I'_U . Взаимодействие магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 с полем вихревых токов создает вращающий момент $M_{BP} = k\Phi_1\Phi_2 \sin \psi$ (k – постоянный коэффициент, определяемый конструкцией счетчика).

Поток Φ_1 пропорционален току нагрузки I , поток Φ_2 пропорционален приложенному напряжению U . Кроме того, $\psi = \pi/2 - \varphi$ (т.е. $\sin \psi = \cos \varphi$), поэтому

$$M_{BP} = k_1 UI \cos \varphi = k_2 P$$

(вращающий момент пропорционален активной мощности).

Противодействующий момент, создаваемый магнитом 6, равен

$$M_{PP} = k_3 \Phi_M I_D,$$

где Φ_M – поток магнита,
 I_D – ток, наводимый в диске,
 $I_D = E_D / z_D$, E_D – э.д.с., наводимая в диске,
 $E_D = C_e \Phi_M n$, n – число оборотов диска.
 Тогда $M_{PP} = k_4 n$.

Согласно условию равновесия $M_{PP} = M_{BP}$, $k_2 P = k_4 n$, или $P = \frac{k_4}{k_2} n$.

Энергия равна $W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{k_4}{k_2} n dt = CN$, где C – конструктивная

постоянная [Вт·с/об], N – число оборотов.

Схемы включения одно- и трехфазных счетчиков электроэнергии

Типовая схема включения однофазного счетчика приведена на рисунке 29, а. Требование соблюдения полярности подключения как по току, так и по напряжению является обязательным.

На рисунке 29, б приведена схема включения счетчика с обратной полярностью в токовой цепи. В данном случае изменение направления тока в цепи создает отрицательный вращающий момент, и диск будет вращаться в обратную сторону.

Рисунок 29, в – включение с обратной полярностью и в цепи тока, и в цепи напряжения. В этом случае фазы тока и напряжения одновременно изменяются на 180° , а угол фазового сдвига остается прежним, поэтому счетчик измеряет электроэнергию в соответствии со своим классом точности. На практике такая схема недопустима, т.к. она допускает безучетное использование электроэнергии.

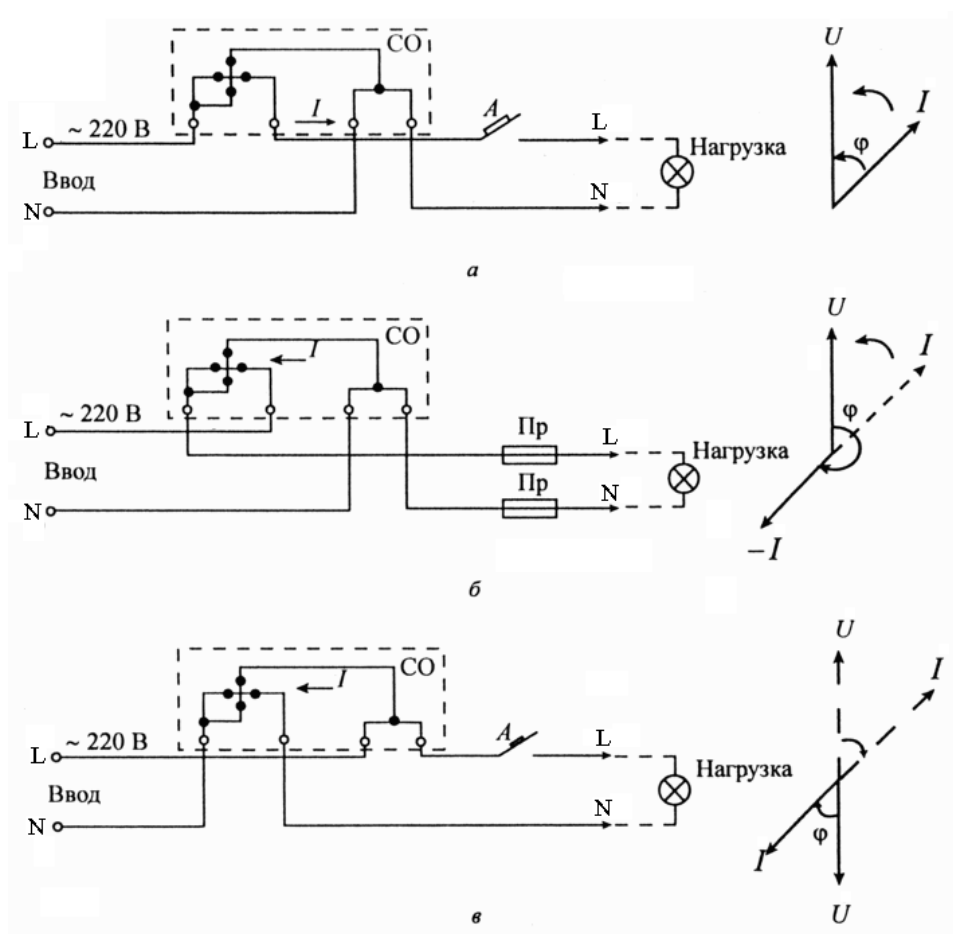


Рис. 29. Схемы включения и ВД однофазного счетчика

В трехфазных четырехпроводных сетях напряжением 380/220 В. применяются счетчики прямого включения (прямоточные) и счетчики, подключаемые через трансформаторы тока и напряжения – трансформаторные счетчики. Счетчики прямого включения выпускаются на номинальные токи 5, 10, 20, 50 А. Подключение токовой цепи осуществляется последовательно с линейными проводниками сети с обязательным соблюдением полярности и прямого порядка чередования фаз напряжений. Подключение с обратной полярностью одной из токовых цепей приводит к значительному недоучету энергии. Схемы подключения приведены на рис. 30, 31, 32.

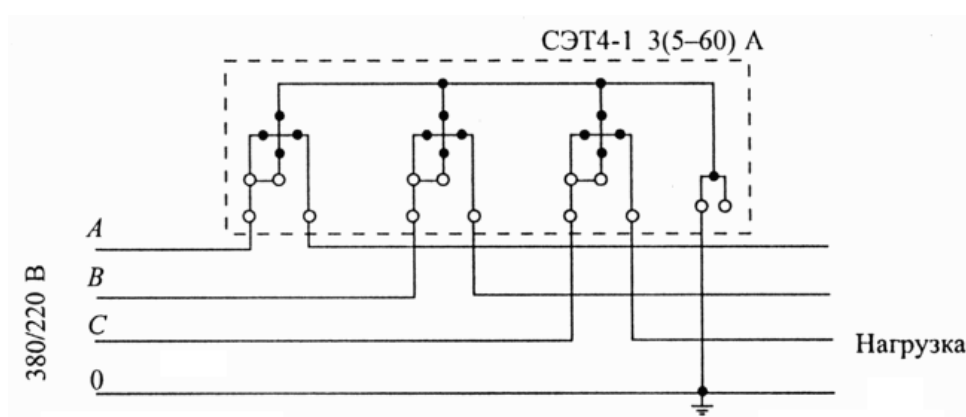


Рис. 30. Схема включения прямоточного счетчика типа СЭТ4-1

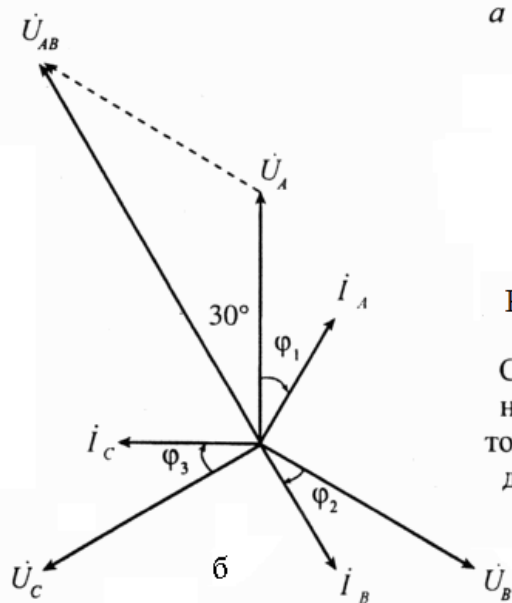
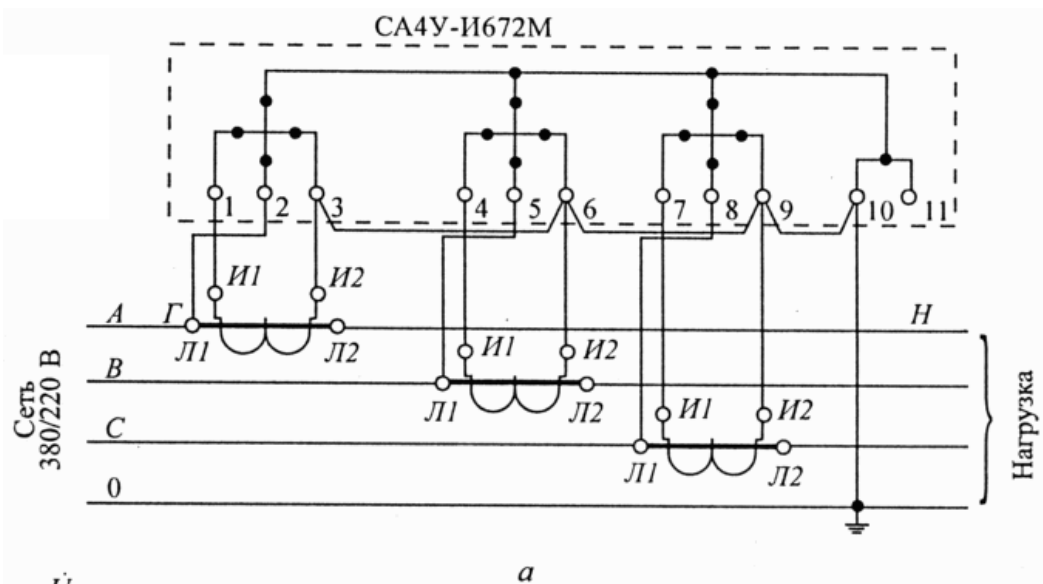
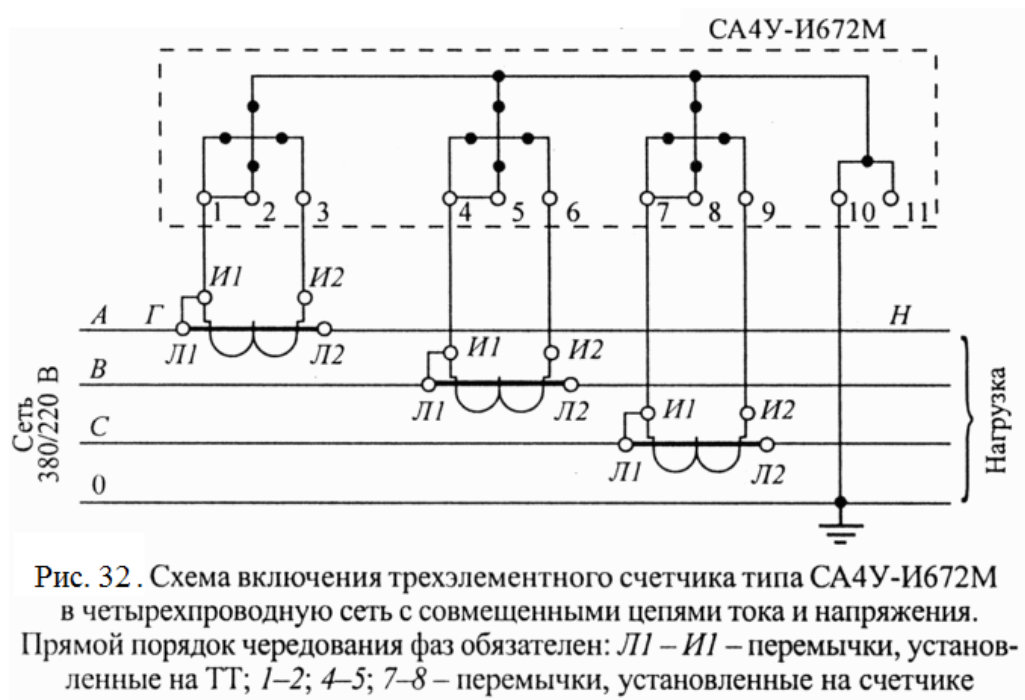


Рис. 31. Схема включения трех-элементного счетчика типа СА4У-И672М в четырехпроводную сеть с раздельными цепями тока и напряжения (а) и векторная диаграмма (б). Прямой порядок чередования фаз обязателен



Приборы электростатической системы

В ПЭСС вращающий момент создается в результате действия сил электрического поля, т.е. здесь в отличие от механизмов других систем перемещение подвижной части осуществляется непосредственно за счет приложенного напряжения. Таким образом, эти приборы по своему принципу действия являются приборами, измеряющими только напряжение.

По устройству ПЭСС – это плоский конденсатор, ёмкость которого меняется при перемещении его подвижной части. Щади электродов, либо изменением расстояния между ними. На рис. 33 приведена схема устройства электростатического прибора. Подвижная алюминиевая пластина 1, закрепленная вместе со стрелкой на оси 3, может перемещаться, взаимодействуя с двумя электрически соединенными неподвижными пластинами 2.

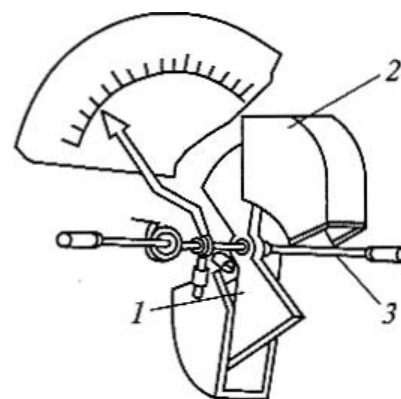


Рис. 33.

Электростатический ИМ

Входное напряжение подается на подвижную и неподвижную пластины. Под действием электростатических сил подвижная пластина втягивается между неподвижными пластинами.

Вращающий момент $M_{ep} = \frac{dW_{эл}}{d\alpha}$, где энергия электрического поля заряженного конденсатора $W_{эл} = CU^2/2$. Поэтому

$$M_{ep} = \frac{1}{2}U^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где C – емкость между пластинами конденсатора.

Из условия равенства вращающего и противодействующего моментов получаем уравнение шкалы прибора:

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

Шкала, как видно из этого выражения, у ПЭСС квадратичная, поэтому изменение полярности измеряемого напряжения не меняет направление движения подвижной части. Конструктивно добиваются частичной линеаризации шкалы так, что рабочая часть начинается примерно с 1/5 части общей длины шкалы.

Достоинства: не потребляют энергии в цепях постоянного тока и имеют очень незначительное потребление в цепях переменного тока; классы точности: 0,05; 0,1; 1,0; 1,5; 2,5; частотный диапазон 20 Гц...10 МГц, диапазон измерений постоянного напряжения 10 В...7500 кВ, переменного напряжения 30 В...7500 кВ; независимость показаний от изменения температуры, частоты и формы кривой измеряемого напряжения, а также внешних магнитных полей.

Недостатки: низкая чувствительность, неравномерная шкала, сказывается влияние внешних электрических и электростатических полей.

Применяются в качестве вольтметров, в основном для измерения высоких напряжений без предварительного преобразования.

Приборы магнитоэлектрической системы с входными преобразователями

Используются *три варианта преобразователей*:

1. Входные выпрямители (приборы с такими преобразователями называют выпрямительными);
2. Входные термопреобразователи (термоэлектрические приборы);
3. Входные электронные преобразователи (электронные вольтметры).

1. ПМЭС с выпрямителями

Выпрямители в этих приборах в качестве вентилей содержат полупроводниковые диоды на основе кремния или германия. В зависимости от числа применяемых диодов и схемы их включения осуществляется одно- и двухполупериодное выпрямление (преобразование) переменного тока. В цепи однополупериодного выпрямления (рис. 34, а) ток через измеритель (микроамперметр), включенный последовательно с диодом $VD1$, протекает только в положительный полупериод напряжения $u(t)$. В отрицательный полупериод ток протекает через диод $VD2$.

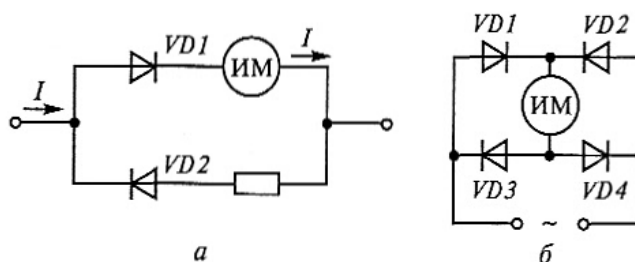


Рис. 34. Включение ИМ с однополупериодным (а) и двухполупериодным (б) выпрямителями

Подвижная часть магнитоэлектрического ИМ из-за своей инерционности реагирует на среднее значение момента

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} m_t dt ,$$

где m_t – среднее значение момента. С учетом того, что для ПМЭС $M_{\text{ср}} = \psi_0 I = B S w I$, получим

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} BS_{wi}(t) dt = \frac{1}{2} BS_{wI_{\text{ср}}}.$$

Из условия равенства вращающего и противодействующего моментов получаем уравнение шкалы прибора:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{BS_w}{W} I_{\text{ср}}.$$

Прибор, таким образом, реагирует на среднее значение тока, но шкалу обычно градуируют в действующих значениях. Тогда последнее выражение примет вид

$$\alpha = \frac{BS_w}{W} \cdot \frac{I}{K_{\phi}} = 0,45 \frac{BS_w I}{W}$$

(K_{ϕ} – коэффициент формы сигнала).

В цепи двухполупериодного выпрямления (рис. 34, б) ток I_u протекает через микроамперметр в одном и том же направлении оба полупериода, и будет в два раза больше тока через прибор в однополупериодной схеме. Соответственно, вдвое выше будет и момент:

$$M_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} m_i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} BS_{wi}(t) dt = BS_{wI_{\text{ср}}},$$

а уравнение шкалы примет вид

$$\alpha = \frac{BS_w}{W} \cdot \frac{2I}{K_{\phi}} = 0,9 \frac{BS_w I}{W}.$$

Достоинства: высокая чувствительность (у однополупериодной схемы выше чувствительность к малым напряжениям, но ниже по току, у двухполупериодной – наоборот), малое собственное потребление мощности, широкий частотный диапазон – возможность работы без частотной компенсации на частотах до 2000 Гц, с частотной компенсацией – до 20 кГц.

Недостатки: зависимость показаний от формы кривой измеряемого напряжения, необходимость введения частотной и температурной компенсации, невысокая точность (1,0; 1,5; 2,5; 4) из-за нелинейности вольт-амперных характеристик диодов.

II. ПМЭС с термопреобразователями

Термоэлектрический преобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя, по которому протекает измеряемый ток. Нагреватель обычно изготавливается из материала с большим удельным сопротивлением (нихром, константан, вольфрам) с допустимой температурой 600...800 °С. Для термопары подбирают материалы, дающие в паре высокую термоЭДС, обладающие устойчивыми термоэлектрическими характеристиками (хромель-копель, медь-копель и др.).

Различают контактные термоэлектрические преобразователи, у которых горячий спай термопары 2 приварен к нагревателю 1 (рис. 35, а), и бесконтактные термоэлектрические преобразователи (рис. 35, б), у которых нагреватель 1 и горячий спай разделены изолятором 3 (каплей стекла), что уменьшает чувствительность и увеличивает инерционность преобразователя. Преимуществом бесконтактных преобразователей является изоляция цепи термопары от нагревателя и возможность создания термобатарей (рис. 35, в).

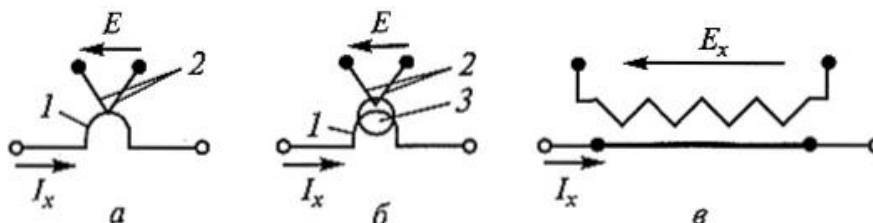


Рис. 35. Термопреобразователи

Под действием теплоты, выделяемой нагревателем, и при разности температур горячего и холодного спаев термопары возникает термоЭДС E , пропорциональная току I_x , протекающему по нагревателю, и измеряемая магнитоэлектрическим ИМ.

Достоинства: малое влияние частоты (и формы кривой) переменного тока; высокий частотный диапазон (10 Гц... 100 МГц); класс точности 0,5; 1,0 и ниже; диапазоны измерения по току 100 мА...10 А, по напряжению 0,75...50 В; низкое входное сопротивление (200...300 Ом/В).

Недостатки: малая перегрузочная способность, зависимость показаний от температуры окружающей среды, низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, неравномерная шкала.

Термоэлектрические приборы используются в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров.

III. ПМЭС с электронными входными преобразователями (электронные вольтметры)

Основное назначение электронных вольтметров (ЭВ) – измерение напряжения в цепях постоянного, переменного тока в широком диапазоне частот.

Классификация:

1. По способу измерения – приборы непосредственной оценки и приборы сравнения;
2. По назначению – приборы постоянного, переменного, импульсного напряжений, универсальные (постоянного и переменного напряжений), тселективные (с частотно-избирательными свойствами);
3. По характеру измеряемого напряжения – амплитудные (пиковые), действующего и среднего значений;
4. По частотному диапазону – низкочастотные и высокочастотные.

ЭВ постоянного тока. Структурная схема (рис. 36) включает в себя:



Рис. 36. ЭВ постоянного
тока

который, помимо функций усиления сигнала по напряжению и мощности, согласует высокое выходное сопротивление ВУ с малым сопротивлением измерительного механизма ИМ.

Входное сопротивление электронных вольтметров составляет десятки мегаом, что практически исключает их влияние на объект измерения.

Характеристики: диапазон измеряемых напряжений для вольтметров 10 мВ...1000 В и для микровольтметров 10^{-8} ...1 В. Классы точности: 1,5; 2,5. Шкала — линейная.

ЭВ переменного тока. Структурная схема, приведенная на рис. 37, а, используется в вольтметрах для измерения напряжений значительного уровня.

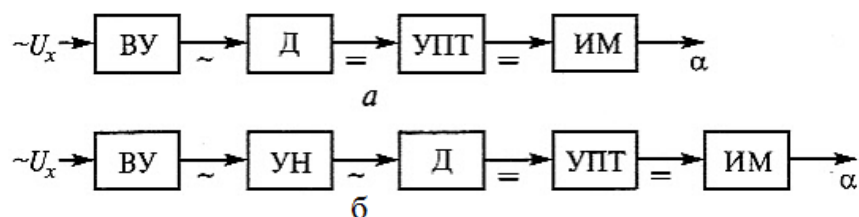


Рис. 37. Структурные схемы ЭВ переменного тока

Измеряемое напряжение, после прохождения входного устройства ВУ, преобразуется детектором Д в напряжение постоянного тока, которое усиливается УПТ и поступает на измерительный механизм ИМ магнитоэлектрической системы. Частотные характеристики таких вольтметров определяются только входным устройством и детектором и составляют 10 Гц...1 ГГц. Диапазон измеряемых напряжений начинается с 0,1 В и выше.

Другая структурная схема (рис. 37, б) применяется в милливольтметрах, поскольку обладает большей чувствительностью за счет использования дополнительного усилителя. Измеряемое напряжение, после прохождения входного устройства ВУ, поступает на вход усилителя переменного напряжения УН, далее на вход детектора Д и через усилитель постоянного тока УПТ на измерительный механизм ИМ. Частотный диапазон таких приборов определяется частотными характеристиками усилителя переменного тока (трудно изготовить широкополосный усилитель

переменного тока) и ограничивается до 1 МГц. Диапазон измеряемых напряжений составляет от единиц милливольт до нескольких сотен вольт.

Универсальные ЭВ представляют собой сочетание схем ЭВ постоянного и переменного токов.

Часть 5. МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Мостовые измерительные схемы служат для сравнения двух напряжений или двух сопротивлений. В основе работы мостовых схем лежит дифференциальный или нулевой метод сравнения. При использовании дифференциального метода получают неуравновешенно-показывающие мосты, нулевого – уравновешенно-показывающие.

Всякая мостовая измерительная схема содержит три основные части:

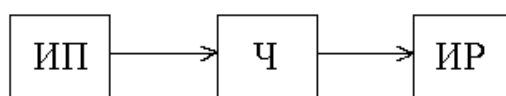


Рис. 38. Структура измерительного моста

ИП – источник питания,

Ч – четырехполюсник,

ИР – индикатор равновесия.

Основная область применения мостовых схем – измерение параметров электрических цепей (сопротивления, емкости, индуктивности и др.).

В зависимости от типа применяемого источника питания мосты бывают *постоянного* и *переменного тока*, в зависимости от типа четырехполюсника – *четыrehплечные (одинарные)* и *шестиплечные (двойные)*.

Одинарный мост

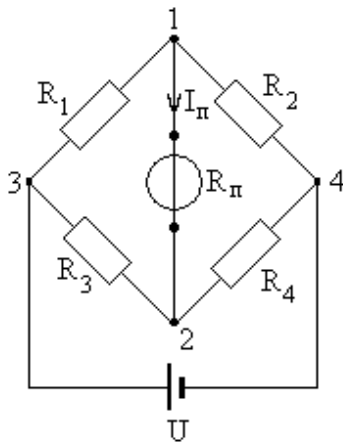


Рис. 39. Одинарный мост
постоянного тока

Источник питания здесь – постоянного тока. В качестве индикатора равновесия чаще всего применяется прибор магнитоэлектрической системы (гальванометр).

Для определения величины тока через прибор I_n воспользуемся методом эквивалентного генератора:

$$I_n = \frac{U_{12XX}}{R_{\Sigma} + R_n},$$

где R_{Σ} – сопротивление цепи по отношению к зажимам 1-2, когда цепь ИР разомкнута, а источник питания заменен его внутренним сопротивлением.

$$I_n = U \cdot \frac{\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} + R_n} =$$

$$= U \cdot \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2) + R_n (R_1 + R_2) (R_3 + R_4)}$$

По нулевому методу ток в цепи ИР должен быть $I_n=0$. Тогда условием равновесия моста является выражение

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

Если измеряемое сопротивление $R_x=R_1$, то оно будет равно

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Уравновешивания моста добиваются путем изменения сопротивлений одного или нескольких плеч моста (например, $R_2=\text{const}$, $R_3/R_4=\text{var}$).

Важной характеристикой мостовых схем является их чувствительность – по току, напряжению, мощности. Чувствительностью называется отношение изменения тока ΔI_{Π} , напряжения ΔU_{Π} , или мощности ΔP_{Π} в цепи индикатора равновесия к относительному изменению сопротивления R_i одного из плеч моста (или к абсолютному изменению сопротивления); например, чувствительность по току определяется из выражений:

$$S_i = \frac{\Delta I_{\Pi}}{(\Delta R_i / R_i)} \quad \text{или} \quad S_i = \frac{I_{\Pi}}{\Delta R_i}.$$

Чувствительность моста по напряжению и мощности определяется выражениями, структура которых аналогична вышеприведенному.

Одинарные мосты применяются для измерения сопротивлений от 10^1 до 10^6 Ом. При проведении измерений с помощью одинарных мостов в результат измерения неизбежно входят величины сопротивлений соединительных проводов, контактные сопротивления, и т.п. Для исключения связанной с этим погрешности при измерениях сопротивлений менее 10 Ом используются двойные мосты.

Двойной мост

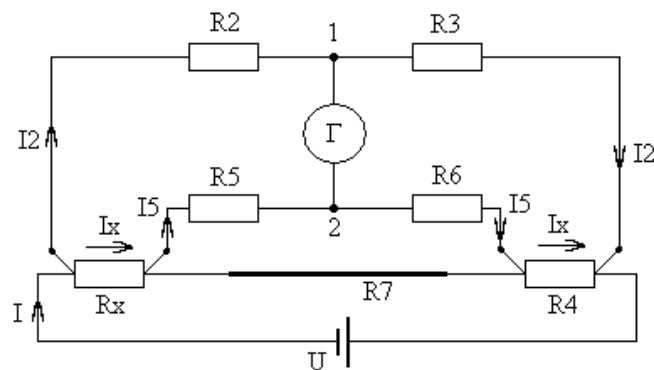


Рис. 40. Двойной мост постоянного тока

Сопротивления R_x , R_7 , R_4 обычно малы, поэтому основная часть тока I протекает по этим элементам схемы. Потенциальные зажимы R_x и R_4 включаются в плечи моста, образуемые резисторами R_2 , R_3 , R_5 и R_6 . Так как их сопротивления выбираются сравнительно большими, то сопротивления соединительных проводов и переходные сопротивления контактов, включенных в эти плечи, на результат измерения влияния практически не оказывают.

В уравновешенном состоянии ток через измерительную диагональ 1-2 моста отсутствует. При этом:

$$I_x R_x + I_5 R_5 - I_2 R_2 = 0,$$

$$I_x R_4 + I_5 R_6 - I_2 R_3 = 0,$$

$$(I_x - I_5) R_7 = I_5 (R_5 + R_6).$$

После деления всех уравнений на I_x и исключения I_2/I_x и I_5/I_x находим:

$$R_x = R_4 \frac{R_2}{R_3} + \frac{R_6 R_7}{R_5 + R_6 + R_7} \left(\frac{R_2}{R_3} - \frac{R_5}{R_6} \right)$$

Последнее уравнение отличается от ранее рассмотренного условия равновесия одинарного моста наличием второго слагаемого. Во избежание погрешности, которая может быть им внесена, его стремятся уменьшить, для чего перемычку R_7 , соединяющую сопротивления R_x и R_4 , выполняют из толстого провода или шины и, кроме того, стремятся обеспечить выполнение условия $R_2/R_3 = R_5/R_6$. В силу того, что отношение R_2/R_3 зависит от R_x , то для

выполнения данного условия переключатели плеч R_5 и R_6 механически спаривают с переключателями плеч R_2 и R_3 . Двойные мосты применяют для измерения малых сопротивлений (в диапазоне от 10^{-8} до 10^1 Ом).

Мост переменного тока

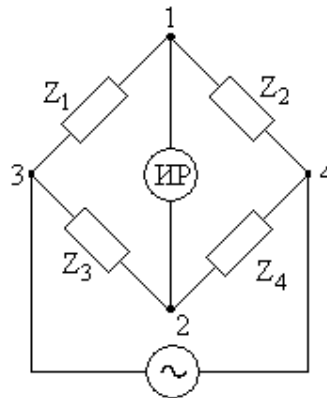


Рис. 41. Одинарный мост переменного тока

Условие равновесия для моста: $\underline{Z}_1 \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_3$, где \underline{Z} — комплексные сопротивления плеч моста. Иначе

$$z_1 e^{j\varphi_1} \cdot z_2 e^{j\varphi_4} = z_2 e^{j\varphi_2} \cdot z_3 e^{j\varphi_3}.$$

Таким образом, получаем два условия равновесия:

- по модулю $z_1 z_4 = z_2 z_3$,

- по фазе $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$.

Условие равновесия можно записать иначе:

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_4 - X_1 X_4 &= R_2 R_3 - X_2 X_3, \\ R_1 X_4 + R_4 X_1 &= R_2 X_3 + R_3 X_2. \end{aligned} \right\}$$

(здесь R и X — компоненты \underline{Z} , $\underline{Z} = R + jX$).

Таким образом, здесь требуется минимум два регулируемых элемента (обычно это резисторы). При помощи мостов переменного тока обычно измеряют индуктивности и емкости.

Мост переменного тока для измерения индуктивности

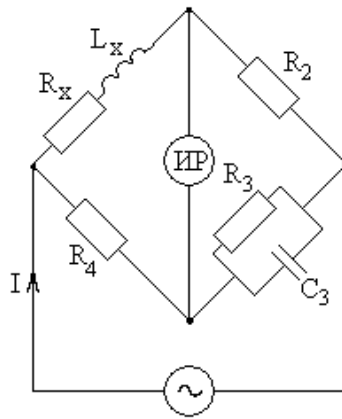


Рис. 42. Мост для измерения индуктивности

В схеме моста R_x , L_x – измеряемая индуктивность, R_3 – переменное сопротивление, C_3 – образцовая емкость.

Из условия равновесия $\underline{Z}_1 \underline{Z}_3 = \underline{Z}_2 \underline{Z}_4$ следует, что

$$(R_x + j\omega L_x) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_3} + j\omega C_3} = R_2 R_4,$$

$$R_x = R_2 \cdot \left(\frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$L_x = R_2 R_4 C_3$$

$$\text{Добротность катушки } Q_x = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_3 R_3.$$

Используется для катушек с добротностью $Q < 30$.

Мост переменного тока для измерения емкости

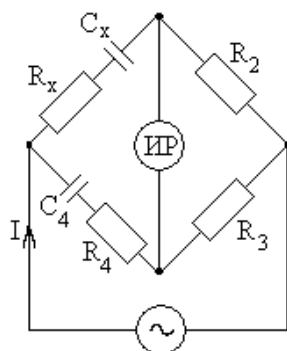


Рис. 43. Мост для измерения емкости

Здесь R_x , C_x – исследуемый конденсатор, C_4 – образцовая емкость.

Условие равновесия:

$$\left[R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right] R_3 = R_2 \left[R_4 + \frac{1}{j\omega C_4} \right];$$

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

Тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega R_4 C_4$.

Резистор R_3 градуируют в единицах емкости, R_4 – в значениях $\operatorname{tg} \delta$.

Погрешности мостов

Определяются погрешностями отдельных элементов схемы, влиянием соединительных проводов, нестабильностью параметров источника питания, и т.п. Погрешность моста задается по модулю в процентах от измеряемой величины, например: $\Delta X = \pm(a + bX)$, где a – постоянная величина, b – коэффициент пропорциональности, X – измеряемая величина. Например, $\Delta L = 0,01L + L'$, тут $L' = \text{const}$. ΔL – абсолютная погрешность моста; относительная погрешность будет равна $\gamma_{\text{отн}} = (\Delta L / L) \cdot 100\% = (1 + (L' / L)) \cdot 100\%$.

Часть 6. Измерительные генераторы

Измерительные генераторы (ИГ) – это источники напряжения, вырабатывающие сигналы различной формы, амплитуды и частоты.

ИГ классифицируют:

1. По диапазону частот генерируемых сигналов:
 - 1.1. НЧ (звуковые и ультразвуковые);
 - 1.2. ВЧ;
 - 1.3. СВЧ.
2. По форме сигнала:
 - 2.1. Генераторы синусоидальных сигналов (ГСС);
 - 2.2. Генераторы сигналов (ГС).

ГСС калибруются по выходному напряжению, мощности и частоте (это генераторы стандартных сигналов). Генераторы некалиброванных сигналов имеют пониженную точность калибровки, но более мощный выходной сигнал.

ГС бывают:

- а). генераторы импульсных сигналов;
- б). генераторы шумовых сигналов (обладают очень широким частотным спектром выходного сигнала);
- в). генераторы специальных сигналов.

ИГ низкой частоты

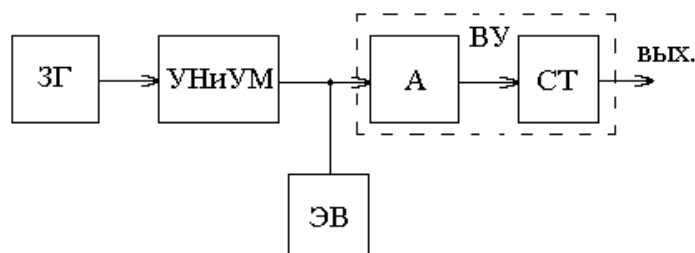


Рис. 44. ИГ низкой частоты

ЗГ – задающий генератор, создает стабильные по частоте и амплитуде синусоидальные колебания;

УНиУМ – усилители напряжения и мощности; колебания ЗГ УНиУМ доводят до необходимого энергетического уровня;

ВУ – выходное устройство, включает в себя А – аттенюатор и СТ – согласующий трансформатор, и создает в нагрузке заданную величину напряжения (мощности), согласуя выходное сопротивление ИГ с сопротивлением нагрузки (которые должны быть приблизительно равны);

ЭВ – электронный вольтметр, служит для контроля величины сигнала.

Параметры: такие ИГ выдают синусоидальные колебания с плавно регулируемой частотой (в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц) и амплитудой, плавно или ступенчато регулируемой в диапазоне от 10^{-4} В (милливольты) до ≈ 150 В.

Характеристики ИГ:

1. Коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник) – характеризует отличие формы сигнала от синусоиды:

$$k_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где 2, 3, ..., n – номера высших гармонических составляющих, n – число учитываемых гармоник.

k_{Γ} зависит от частоты и выходной мощности сигнала (на практике k_{Γ} до 1%). Чем меньше k_{Γ} , тем лучше генератор.

2. Диапазон генерируемых частот, характеризуется коэффициентом перекрытия: $k_{\text{пер.}} = f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$. [-----]

$$\begin{array}{cc} f_{\text{min}} & f_{\text{max}} \\ 20 \text{ Гц} & 20 \text{ кГц} \end{array}$$

3. Стабильность частоты генератора, характеризуется отношением абсолютного изменения частоты Δf к начальной частоте f_0 : $\Delta f' = (\Delta f / f_0) \cdot 100\%$,

при этом $\Delta f = f_0 - f_1$, где f_1 – частота, измененная под действием внешних условий, f_0 – начальная частота. Причиной дестабилизации являются изменение температуры окружающей среды, напряжения питающей сети, изменение геометрических размеров элементов колебательных контуров, и др.

По рассмотренной схеме построены приборы ГЗ-36, ГЗ-56, и др.

Импульсный ИГ.

Служит для выработки импульсов различной формы (прямоугольных, треугольных, пилообразных, трапецеидальных и др.), полярности, амплитуды, длительности, частоты следования.

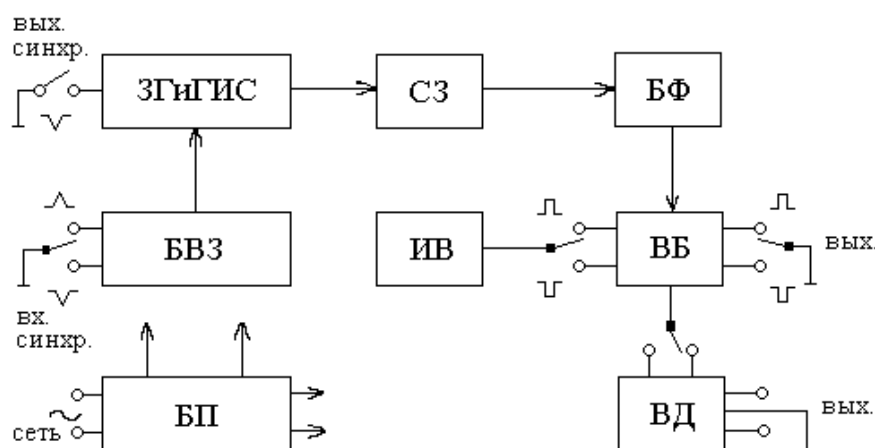


Рис. 45. Импульсный измерительный генератор

ЗГиГИС – задающий генератор и генератор импульсов синхронизации. вырабатывает импульсы с плавно регулируемой частотой для запуска последующих узлов ИГ и выдает синхронизирующий импульс обеих полярностей тех же частот для запуска других устройств («выход синхронизации»);

БВЗ – блок внешнего запуска, позволяет производить запуск генератора от внешних устройств («вход синхронизации»). При этом частота

следования выходных импульсов ИГ задается частотой запускающих импульсов;

БП – блок питания, вырабатывает питающие напряжения для других блоков;

СЗ – схема задержки, создает временной сдвиг генерируемых импульсов относительно входных импульсов ЗГ. Эти импульсы запускают блок формирования БФ, в котором вырабатываются прямоугольные импульсы необходимой крутизны и амплитуды.

ВБ – выходной блок (усилитель мощности), осуществляет регулировку амплитуды импульсов, изменение полярности и согласование с нагрузкой (по выходному сопротивлению);

ИВ – импульсный вольтметр;

ВД – выходные делители (для ослабления сигнала).

По такой схеме построены, например, приборы Г5-58 (генератор прямоугольных импульсов), Г5-54 (набор импульсов).

Часть 7. ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Осциллограф – это прибор для наблюдения, исследования и регистрации электрических процессов.

Классификация О.:

1. *О. общего назначения* – имеют полосу пропускания от постоянного тока до 100 МГц, диапазон амплитуд сигналов – от единиц милливольт до сотен вольт. Применяется для исследования НЧ-процессов, импульсных сигналов и поверки радиоэлектронной аппаратуры.

2. *Универсальные О.* (обозн. С1) – многофункциональны за счет сменных блоков. Полоса пропускания – та же, что и у О. общего назначения; диапазон амплитуд – от 10^{-6} В (микровольты) до 10^2 В.

3. *Скоростные О.* (обозн. С7) – предназначены для регистрации однократных и повторяющихся импульсных сигналов и периодических колебаний с частотами до единиц ГГц (10^9 Гц). Здесь используются специальные электронно-лучевые трубки (на принципе бегущей волны), отсутствует усилитель вертикального отклонения.

4. *Стробоскопические О.* (обозн. С7) – предназначены для регистрации повторяющихся сигналов в полосе частот от постоянного тока до нескольких ГГц; амплитудный диапазон – от 10^{-3} В до 10^0 В.

5. *Запоминающие О.* (обозн. С8) – предназначены для регистрации однократных и редко повторяющихся импульсов. Используется электронно-лучевая трубка с запоминанием изображения (на 10-30 мин.). Полоса пропускания – до 20 МГц; диапазон амплитуд – от 10^{-2} В до 10^2 В. (*явление запоминания изображения не следует путать с послесвечением*)

6. *Специальные О.* – приборы целевого назначения.

7. *Цифровые О.* (обозн. С9) – нет ЭЛТ, используется матричная индикация; возможность связи с ЭВМ по стандартным интерфейсам.

8. *Светолучевые О.* – предназначены для одновременной регистрации до 24 электрических величин. В основном используются для регистрации

переходных процессов, при наладке и испытаниях систем электро- и электронного оборудования.

Электронно-лучевой осциллограф общего назначения. Принцип действия

ЭЛО содержит следующие основные функциональные блоки (см. рис. 46):

Вх. Ц – входная цепь;

КА – калибратор амплитуды;

КВ – калибратор времени;

БП – блок питания;

КВО – канал вертикального отклонения;

ВхКУВО – входной каскад усилителя вертикального отклонения;

ЛЗ – линия задержки;

ВыхКУВО – выходной каскад усилителя вертикального отклонения;

КГО – канал горизонтального отклонения;

БС – блок синхронизации;

ГР – генератор развертки;

ВыхКУГО - выходной каскад усилителя горизонтального отклонения;

«внешн.», «внутр.», «сеть» - переключатель режимов (видов) синхронизации;

Ус. Z – усилитель канала управления яркостью луча Z;

ЭЛТ – электронно-лучевая трубка.

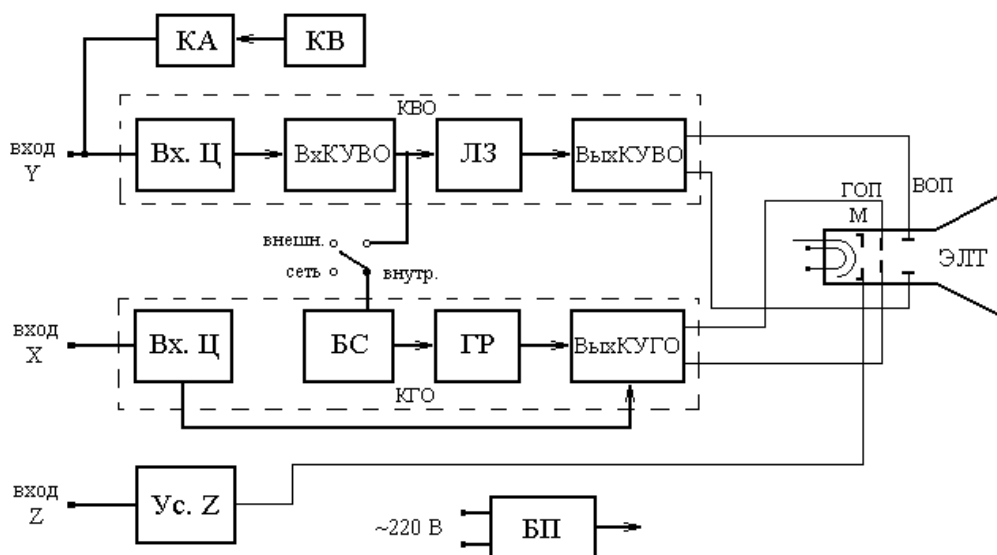
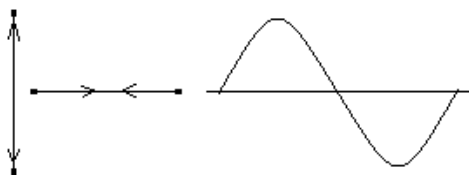


Рис. 46. Блок-схема ЭЛО

ЭЛТ – основной элемент ЭЛО, определяющий его основные характеристики и преобразующий исследуемый сигнал в изображение. Источником электронов в ЭЛТ служит катод, разогреваемый нитью накала (спираль из вольфрамовой проволоки). Поток электронов, испускаемый катодом, с помощью специальной системы ускоряется и формируется в пучок (луч), который отклоняется в двух взаимно-перпендикулярных направлениях и, достигая экрана, покрытого слоем люминофора, вызывает его свечение. Пара вертикально-отклоняющих пластин ВОП отклоняет луч в вертикальном направлении, а пара горизонтально-отклоняющих пластин ГОП – в горизонтальном направлении. Отклонение луча пропорционально напряжению, приложенному к пластинам. Управление яркостью луча осуществляется с помощью управляющего электрода (модулятора М). На модулятор можно подавать внешнее переменное напряжение, которое будет изменять яркость луча и модулировать его во временных координатах.

Напряжение, отклоняющее луч в горизонтальном направлении, называется *развертывающим*.



Т.к. чувствительность ЭЛТ мала, для отклонения луча на весь экран требуется напряжение от 3 до 200 В (в зависимости от конструкции ЭЛТ).

Для получения таких напряжений необходимы усилители УВО и УГО, так как амплитуда исследуемого сигнала может быть много меньше.

УВО определяет назначение О., так как от его параметров зависит полоса пропускания исследуемого сигнала, подаваемого на Y-вход.

Полоса пропускания – это диапазон частот, в пределах которого выходное напряжение УВО падает на 30% от максимального значения при постоянном входном напряжении, то есть коэффициент усиления по напряжению уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз (иначе говоря, сигнал искажается по амплитуде не более чем на 30%, или 3дБ).

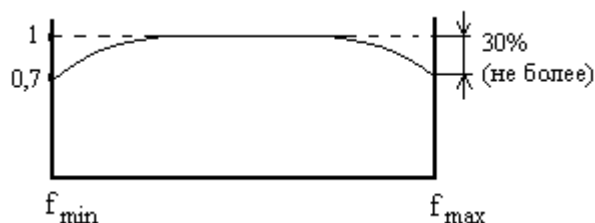


Рис. 47. К понятию полосы пропускания

УВО должен иметь большое входное сопротивление и малую входную емкость.

Входная цепь (аттенюатор) КВО. Так как на УВО подается сигнал определенного уровня, то необходим делитель (аттенюатор) с регулируемым коэффициентом деления.

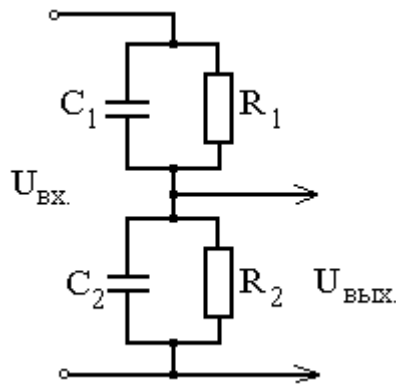


Рис. 48. Атенюатор КВО

Элементы R_1 , R_2 , C_1 , C_2 выполняются регулируемые, и делитель обеспечивает расширение пределов измерения напряжения со ступенчато-изменяемым коэффициентом деления (1:1; 1:10; 1:100....). Резистивно-емкостный делитель необходим для передачи сигнала без искажений в широком диапазоне частот: на НЧ – как омический, на ВЧ – как емкостный, т.е. он частотно скомпенсирован по всей ширине полосы пропускания УВО.

Коэффициент деления аттенюатора $k_d = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ постоянен во всем диапазоне частот.

$$k_d = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = Z_2/Z_1 + Z_2, \text{ где } Z_1 = R_1/(1+j\omega R_1 C_1), Z_2 = R_2/(1+j\omega R_2 C_2).$$

$$\text{Обычно } R_1 C_1 = R_2 C_2, \text{ тогда } k_d = C_1/(C_1 + C_2) = R_2/(R_1 + R_2).$$

Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = R_1 + R_2$, обычно эта величина 1÷2 МОм.

$$\text{Входная емкость } C_{\text{вх}} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2), \text{ порядок ее обычно } 20 \div 40 \text{ пФ.}$$

Генератор развертки.

ГР вырабатывает развертывающее напряжение, которое через ВыхКУГО поступает на ГОП.

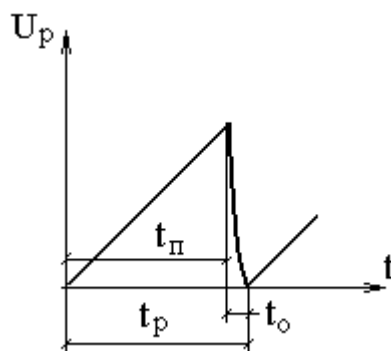


Рис. 49. Развертывающее напряжение

На рис. 49 обозначены: t_p – время развертки, t_{Π} – время прямого хода луча, t_o – время обратного хода луча, при этом $t_p = t_{\Pi} + t_o$; учитывая малость времени обратного хода, можно принять $t_p \approx t_{\Pi}$.

Пилообразное напряжение нарастает линейно (скорость развертки луча постоянна) – это *линейная развертка*.

(чем меньше t_o , тем лучше).

Блок синхронизации.

Для получения на экране ЭЛО неподвижного изображения, необходимо выполнение следующих условий:

$$t_p = nT \quad (1)$$

$$f_p = f/n$$

здесь T – период исследуемого сигнала, f – частота исследуемого сигнала, n – целое число. ($f_p = 1/t_p$)

В этом случае начала развертки будут совпадать со мгновенными значениями сигнала, имеющими одну и ту же фазу.

Процесс принудительного генерирования напряжения развертки U_p в соответствии с (1) называется *синхронизацией*, для чего в ГР подают синхронизирующий (запускающий) импульс.

Синхронизация может осуществляться:

а) частью исследуемого сигнала (берется с ВхКУВО) (переключатель в положении «внутренняя синхронизация»);

б) напряжением от сети с частотой 50 Гц (переключатель в положении «сеть»);

в) напряжением от постороннего источника, синхронизируемого с исследуемым сигналом (переключатель в положении «внешняя синхронизация»).

Для исследования сигналов различных частот, частота f_p ГР регулируется в широких пределах.

Яркость регулируется изменением потенциала на модуляторе ЭЛТ (по каналу Z). Фокусировка осуществляется изменением потенциала анодов. Фокусировка в сочетании с яркостью дают четкость изображения.

ГР может работать в следующих режимах развертки:

- 1). Периодическая (непрерывная) развертка – см. рис. 4;
- 2). Автоколебательная развертка – запуск без синхронизирующего импульса;
- 3). Ждущая развертка.

Периодический и автоколебательный режимы применяют для периодических сигналов и импульсов, имеющих малую скважность и затянутые фронты. Ждущий режим используется для импульсов большой скважности с крутыми фронтами и непериодических сигналов.

Режим ждущей развертки

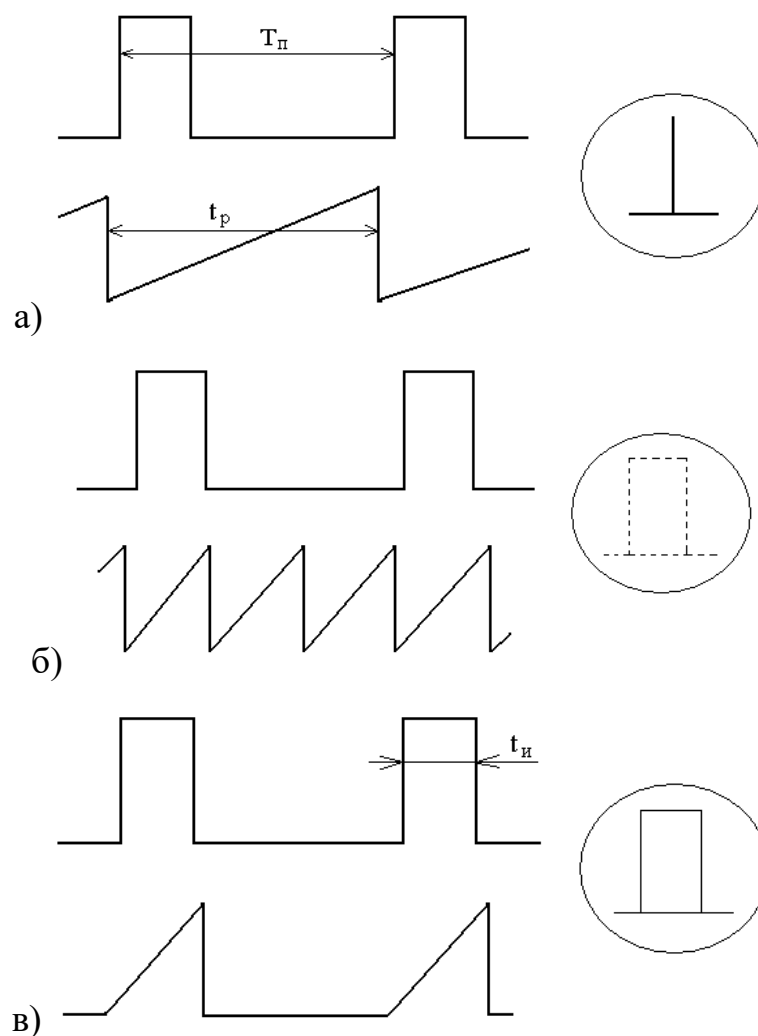


Рис. 50. К понятию режима ждущей развертки

На рис. 50 обозначены: T_{Π} – период повторяемости импульса, t_p – период развертки.

- Рис. 50, а: $t_p = T_{\Pi} \Rightarrow$ на экране импульс не развернется (импульс сжат).

- Рис. 50, б: $t_p \ll T_{\Pi} \Rightarrow$ импульс развернут, но очень размыт.

- Импульс будет четко виден, если ГР запускается в момент прихода импульса, а при отсутствии импульса находится в режиме ждущей развертки, $t_p \approx t_{и}$.

Чтобы увидеть фронты, развертка должна начинаться чуть раньше, чем импульс поступит на ВОП, и оканчиваться чуть позже его окончания. Это возможно осуществить с использованием линии задержки.

Линия задержки обеспечивает регулируемый сдвиг сигнала для получения четкого изображения при ждущей развертке.

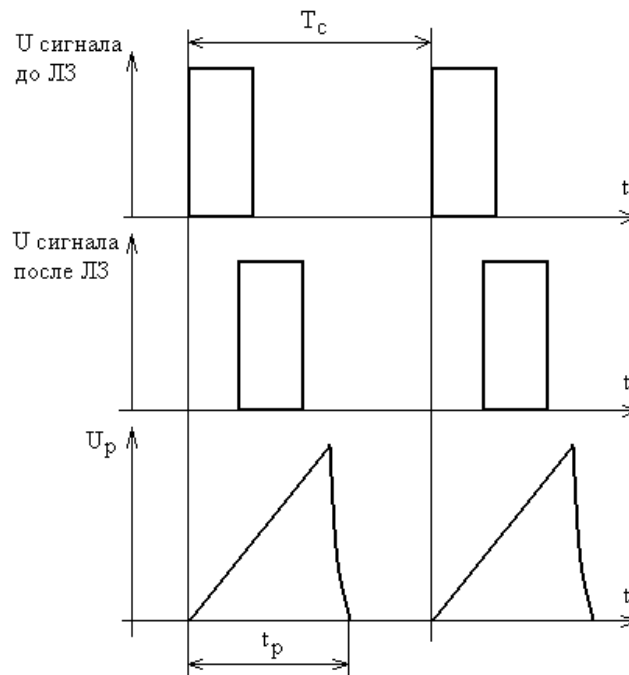


Рис. 51. К пояснению работы ЛЗ

Усилитель горизонтального отклонения.

ВыхКУГО обеспечивает усиление напряжения до необходимой величины для получения требуемого масштаба изображения.

Усилитель Z обеспечивает усиление и подачу внешних сигналов для модуляции электронного луча по яркости.

Калибратор амплитуды определяет масштаб КВО при изменении напряжения входного сигнала: $C_y = U/l$, где l – отклонение луча на экране, U – калибрационное напряжение, C_y – масштаб. $[C_y] = \text{В/мм, В/дел.}$

Калибратор времени служит для определения масштаба по КГО: $C_x = t_k/b$. $[C_x] = \text{сек/дел, Гц/дел, мс/дел, мкс/дел.}$

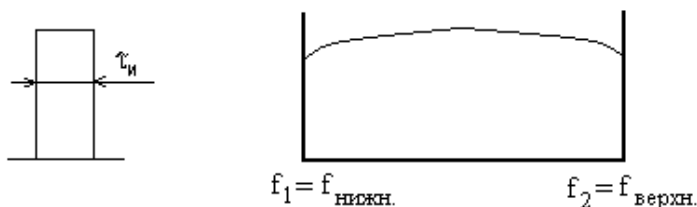
Блок питания обеспечивает остальные блоки напряжениями разного уровня.

Основные характеристики осциллографа

1. *Диаметр трубки* – определяет размер осциллограммы. Чем больше диаметр трубки, тем точнее изображение.

2. *Коэффициент отклонения по напряжению канала вертикального отклонения* – характеризует чувствительность (C_y). обычно задают два значения: через усилитель и прямо на пластины. Например, для ЭЛО С1-54: $C_y=1$ мВ/мм (через усилитель), 10 мВ/мм (без усилителя).

3. *Полоса пропускания осциллографа* – определяется частотной характеристикой УВО. Например, ширину полосы пропускания Δf для исследования прямоугольных импульсов длительностью τ_n выбирают из условия $\Delta f=2/\tau_n$.



На практике обычно принимают $\Delta f \approx f_{\text{верхн.}}$.

$f_v \geq 0,5\tau_{\text{фи}}$ (не менее $\frac{1}{2}$ длительности фронта импульса $\tau_{\text{фи}}$ в сек.)

Нижняя граничная частота полосы пропускания

$$f_n \leq \frac{\Delta U_m}{2\pi\tau_n},$$

где ΔU_m – заданная величина снижения напряжения в долях амплитуды; $\Delta U_m \leq 0,01 U_m$ (при измерениях).

4. *Схема входа* – характеристики входной цепи:

а) открытый или закрытый вход, или тот и другой вместе (*относительно постоянной составляющей сигнала, используется конденсатор*);

б) величина входного сопротивления и входные емкости аттенюатора (чем больше входное сопротивление и меньше входная емкость – тем лучше).

5. *Виды разверток* – периодическая, автоколебательная, ждущая и др.

6. Диапазоны частот периодической развертки и длительность ждущей развертки. Например, для ЭЛО С1-54 – от 0,025 мкс/см до 5 сек/см, весь этот интервал разбит на 40 диапазонов.

7. Нелинейность развертки; у лучших ЭЛО составляет 3 – 5% (чем меньше, тем лучше).

8. Данные калибратора амплитуды и калибратора времени.

9. Погрешность измерения амплитуды; не превышает $(10 \pm 3)\%$.

10. Погрешность измерения длительности; $(10 \pm 3)\%$.

11. Возможность регистрации и выдачи амплитудных и временных параметров в цифровом виде.

12. Количество лучей; обычно ЭЛО бывают одно- и двухлучевые. Возможно увеличение числа лучей с помощью приставки-коммутатора (при этом используется однолучевая ЭЛО для наблюдения двух сигналов).

Светолучевой осциллограф

СЛО используется для одновременного исследования и регистрации большого числа сигналов (до 24-х у отдельных моделей СЛО).

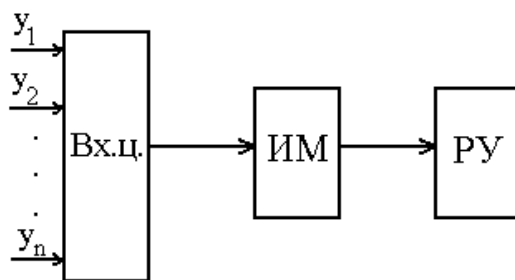


Рис. 52. Функциональная схема СЛО

Вх.ц. – входная цепь, представляет собой магазин шунтов и сопротивлений для сигналов по току и напряжению (делители).

ИМ – измерительный механизм, представляет собой систему, в которой установлены n гальванометров магнитоэлектрической системы.

РУ – регистрирующее устройство.

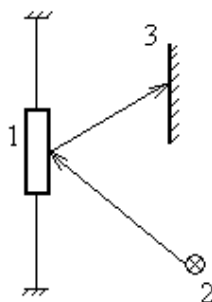
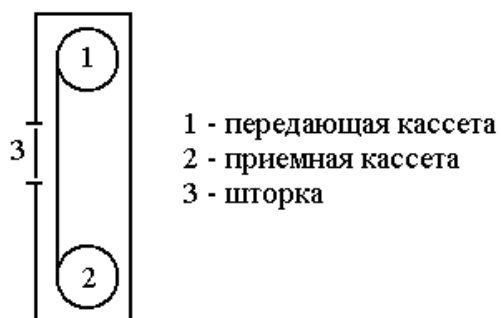


Рис. 53. Гальванометр СЛО

Гальванометр представляет собой рамку на растяжках с зеркальцем вместо стрелки (1 – рамка с зеркальцем, 2 – источник света, 3 – стеклянный экран с регистрирующим устройством в виде кассеты с фотобумагой).

Исследуемые сигналы $y_1 - y_n$ масштабируются (подбором коэффициентов деления и шунтирования) и подаются на ИМ. При этом СЛО последовательно работает в двух режимах:

1. Режим настройки.



В данном режиме фотокассета не вращается, бумага не двигается, шторка 3 закрыта, а двигатель протяжки, соединенный через зубчатую передачу с приемной кассетой 2, отключен. На каналы $y_1 - y_n$ подаются тестовые сигналы и определяется масштаб по каждому каналу (по напряжению в В/мм, по току в А/мм).

2. Режим регистрации (документирования). В этом режиме шторка 3 открыта, двигатель протяжки включен, фотобумага двигается и происходит регистрация исследуемых сигналов на бумаге.

Полоса пропускания гальванометров обычно не превышает 10 кГц.

Применение осциллографов.

Светолучевые осциллографы: применяют, как правило, для регистрации низкочастотных переходных процессов при испытаниях систем электро- и электронного оборудования.

Электроннолучевые осциллографы.

1. *Основная область применения*: исследования и измерения амплитудных и временных параметров непериодических сигналов и периодических сигналов несинусоидальной формы.
2. *Дополнительная область применения*: измерение амплитуды и частоты периодических синусоидальных сигналов.

Если ЭЛО оснащен запоминающей ЭЛТ, то возможно исследование переходных процессов.

Часть 8. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цифровые измерительные приборы (ЦИП) – это приборы, работа которых основана на принципе преобразования непрерывной (аналоговой) измеряемой величины в дискретную (цифровую) с индикацией и регистрацией в цифровой форме.

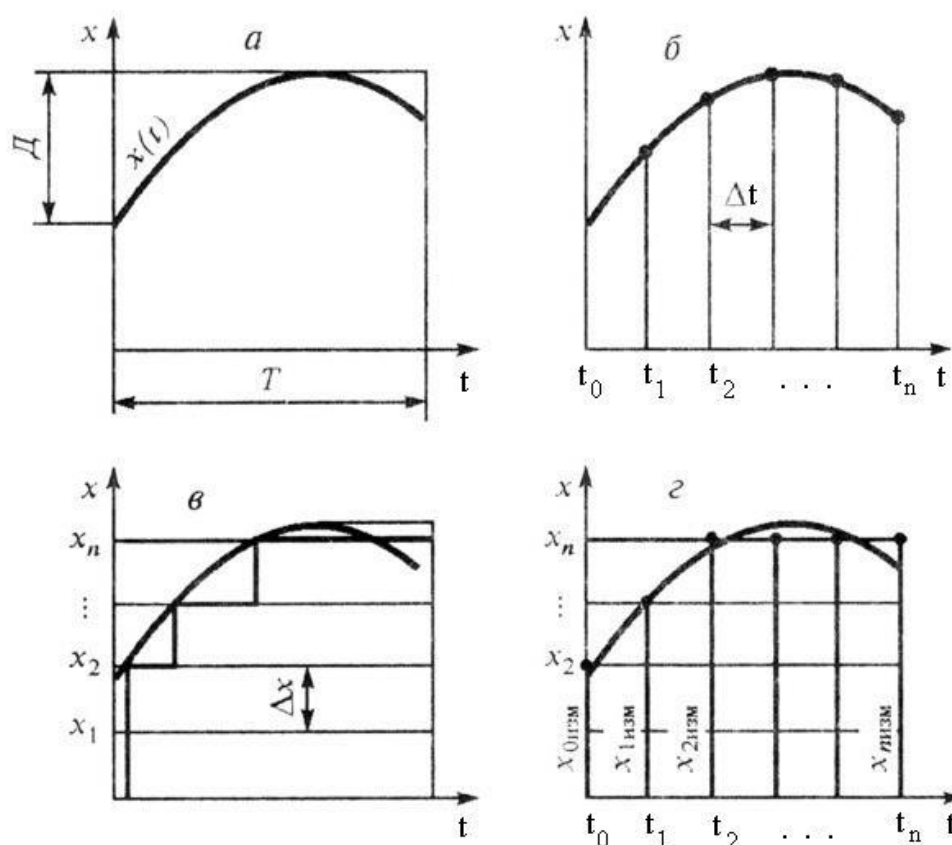


Рис. 54. Дискретизация и квантование непрерывной величины

Непрерывная величина $x(t)$ может иметь в заданном диапазоне D бесконечно большое число значений в интервале времени T при бесконечно большом числе моментов времени (рис. 54, а). Величина может быть непрерывной либо по значению, либо по времени. Величину, непрерывную по значению и прерывную по времени, называют *дискретизированной* (рис. 54, б). Значения дискретизированной величины отличны от нуля только в определенные моменты времени. Величину, непрерывную по времени и прерывную по значению, называют *квантованной* (рис. 54, в). Квантованная величина в диапазоне D может принимать только конечное число значений.

Непрерывная величина может быть дискретизированной и квантованной одновременно (рис. 54, г).

Процесс преобразования непрерывной по времени величины в дискретизированную путем сохранения ее мгновенных значений в моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ (моменты дискретизации) называют *дискретизацией*. Интервал Δt между ближайшими моментами дискретизации называют *шагом дискретизации*.

Процесс преобразования непрерывной по значению величины в квантованную путем замены ее значений ближайшими фиксированными значениями x_1, x_2, \dots, x_n называется *квантованием*. Разность Δx между двумя детерминированными значениями называют шагом квантования. При измерении отсчет значения величины $x(t)$ производится в моменты дискретизации с точностью до ближайшего квантованного значения. Поэтому в общем случае полученное в результате квантования значение $x_{\text{изм}}$ отличается от действительного значения измеряемой величины. Очевидно, что появляющаяся таким образом погрешность может быть снижена за счет уменьшения шага квантования.

Кроме дискретизации и квантования, процесс измерения в ЦИП включает в себя кодирование – получение по определенной системе правил числового значения квантованной величины в виде комбинации цифр (дискретных сигналов), и обратное преобразование – декодирование. Цифровые коды могут строиться по двоичной, двоично-десятичной, десятичной системам.

ЦИП многопредельны и универсальны, измеряют напряжение постоянного и переменного тока, частоту, фазу, сопротивление, мощность и т.д., в том числе неэлектрические величины. ЦИП обладают высокой точностью (до 0,005%) и быстродействием (до $\approx 10^{-5}$ с), но более сложны по сравнению с электромеханическими ИП.

ЦИП различают: по схемно-конструктивному решению, методу аналого-цифрового преобразования, способу компенсации (уравновешивания).

Классификация ЦИП

1. Схемно-конструктивное решение

1.1. Электромеханические ЦИП – строятся по типу компенсаторов и мостов постоянного тока с электромеханическими коммутационными устройствами. Обладают высокой точностью (до 0,005%), но низкой скоростью измерения ($1 \div 2$ с на 1 измерение). Применяются для измерения тока, напряжения, сопротивления.

1.2. Электронные ЦИП – строятся на бесконтактных элементах (ИМС, полупроводниковых приборах, и т.д.), действие основано на методах импульсной техники. Обладают высоким быстродействием (до 10^5 измерений за 1 с), но более низкой точностью ($1 \div 2\%$). Применяются для измерения напряжения, частоты, интервалов времени, фазового сдвига.

2. Методы аналого-цифрового преобразования

2.1. Кодоимпульсный метод (метод поразрядного уравновешивания) – это последовательное сравнение измеряемой величины с рядом дискретных значений известной величины.

2.2. Времяимпульсный метод – преобразование измеряемой величины U_x во временной интервал t с последующим заполнением этого интервала импульсами N известной частоты. $U_x \rightarrow t \rightarrow N$ (рис. 55). Используется в вольтметрах, частотомерах, фазометрах.

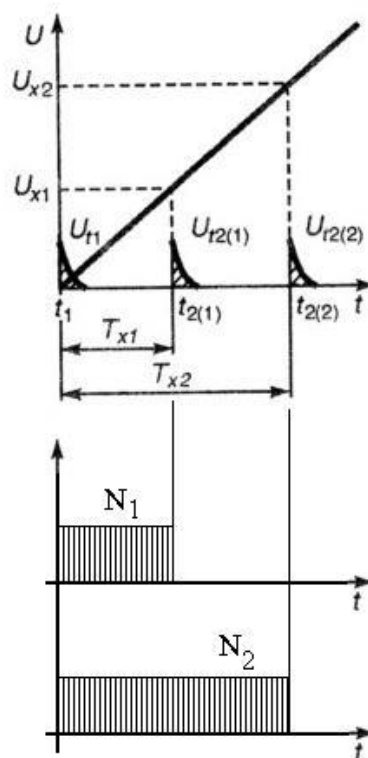


Рис. 55. Принцип преобразования напряжения в интервал времени

2.3. Частотноимпульсный метод – преобразование измеряемой величины U_x в частоту f следования импульсов, а затем в цифровой код N . $U_x \rightarrow f \rightarrow N$. Такие приборы называют интегрирующими.

ЦИП, сочетающие частотноимпульсный и кодоимпульсный методы, называют комбинированными. Они обладают достоинствами электромеханических и электронных ЦИП – высокой точностью при высокой скорости, а также лучше защищены от помех при измерениях.

3. Уравновешивание

3.1. Статическое уравновешивание – измеряемое напряжение U_x сравнивается с образцовым компенсирующим напряжением U_k , изменяющимся дискретно по определенному закону (рис. 56). При $U_x = U_k$ процесс прекращается. Чаще используется в электромеханических ЦИП.

3.2. Динамическое уравновешивание – U_k изменяется принудительно от нуля до максимального значения (как напряжение развертки).

Уравновешивание прекращается в момент $U_X = U_K$ (рис. 57). Применяется в электронных ЦИП.

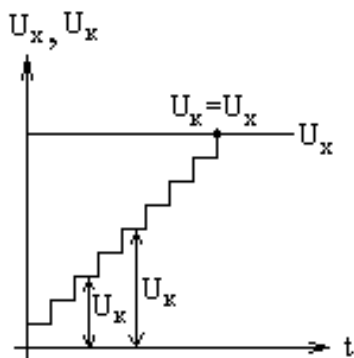


Рис. 56. Статическое уравновешивание

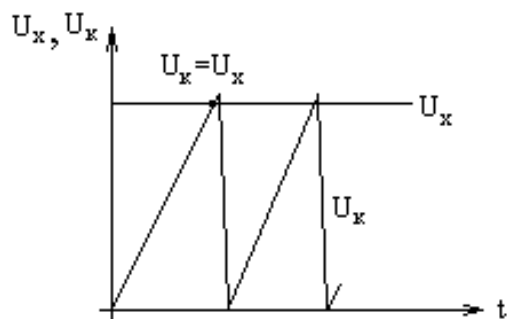


Рис. 57. Динамическое уравновешивание

Цифровая индикация

В момент $U_X = U_K$ результат измерения выводится на цифровой индикатор. Индикаторы бывают: с лампами накаливания (прозрачные пластины из световода с нанесенными на них цифрами и подсветкой с торца), на газоразрядных счетных лампах (у таких ламп катоды выполнены в форме арабских цифр от 0 до 9, аноды – сетка), на люминесцентных и жидкокристаллических индикаторах, на специальных электронно-лучевых трубках, и т.д.

Цифровые вольтметры постоянного тока

Электронно-механический цифровой вольтметр с кодоимпульсным преобразованием

Структурная схема прибора изображена на рис. 58.

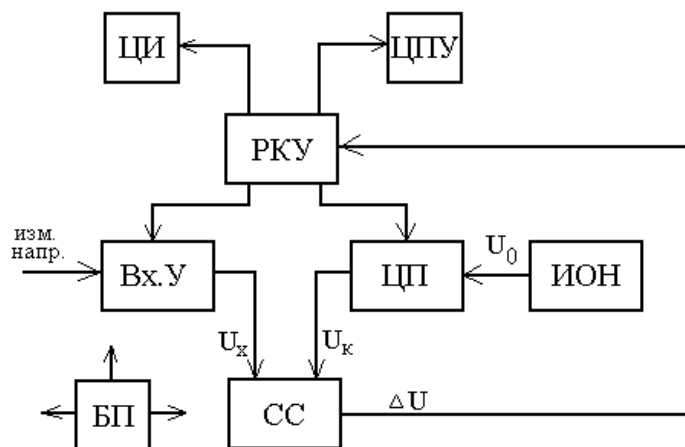


Рис. 58. Структурная схема вольтметра с кодоимпульсным преобразованием

В вольтметрах такого типа происходит последовательное сравнение значений измеряемой величины с рядом дискретных значений образцовой величины. Измеряемое напряжение U_x поступает на входное устройство Вх.У – высокоомный делитель с регулируемым коэффициентом деления.

СС – схема сравнения, на один из входов которой поступает U_x , на другой – дискретное компенсационное напряжение U_k . Сигнал $\Delta U = U_x - U_k$.

ИОН – источник опорного (образцового) напряжения.

ЦП – цифровой потенциометр (рис. 59) состоит из трех декад, каждая из которых содержит 4 резистора с соотношением сопротивлений 2:4:2:1, и добавочной декады с одним резистором «весом» 1. внутри каждой декады величины U_k подбираются таким образом, чтобы можно было быстро получить все значения напряжений от 0 до 9. Сопротивления резисторов каждой декады отличаются от следующей в 10 раз.

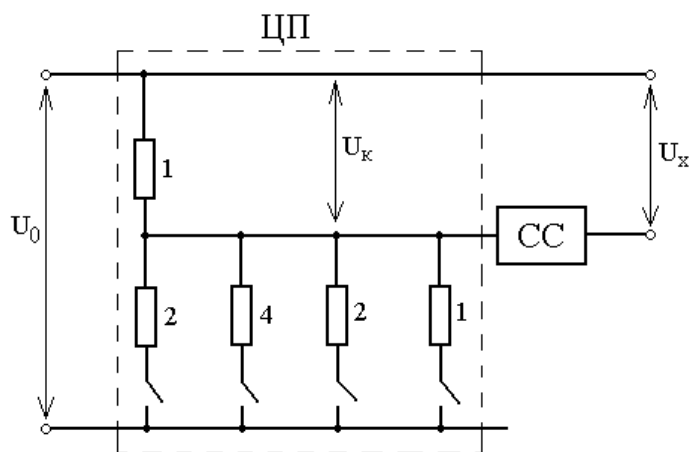


Рис. 59. Электрическая схема ЦП (показана одна декада)

Сигнал разбаланса ΔU поступает в РКУ – релейно-коммутационное устройство. РКУ вырабатывает сигналы, поступающие во входное устройство (переключение коэффициента деления, т.е. пределов измерения) и в ЦП (подбор U_k). Одновременно в процессе уравнивания РКУ формирует код для цифрового индикатора ЦИ и цифropечатающего устройства ЦПУ. При $\Delta U=0$ (определяется с точностью до единицы младшего разряда ЦП), РКУ прекращает уравнивание, а ЦИ фиксирует измеренное напряжение (в десятичной форме).

По такой схеме выполнены приборы ВК2-6, В2-8, В2-9, и др.

Электронный цифровой вольтметр с времяимпульсным преобразованием

В основе работы прибора (рис. 60) лежит преобразование измеряемого напряжения в пропорциональный интервал времени, длительность которого измеряется путем заполнения этого интервала импульсами со стабильной частотой следования (счетными импульсами).

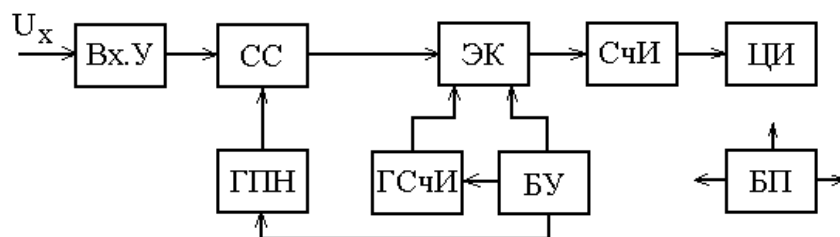


Рис. 60. Структурная схема вольтметра с времяимпульсным преобразованием

Измеряемое напряжение U_x преобразуется во временной интервал Δt генератором пилообразного напряжения ГПН (рис. 61). В течение интервала времени Δt происходит счет импульсов стабильной частоты.

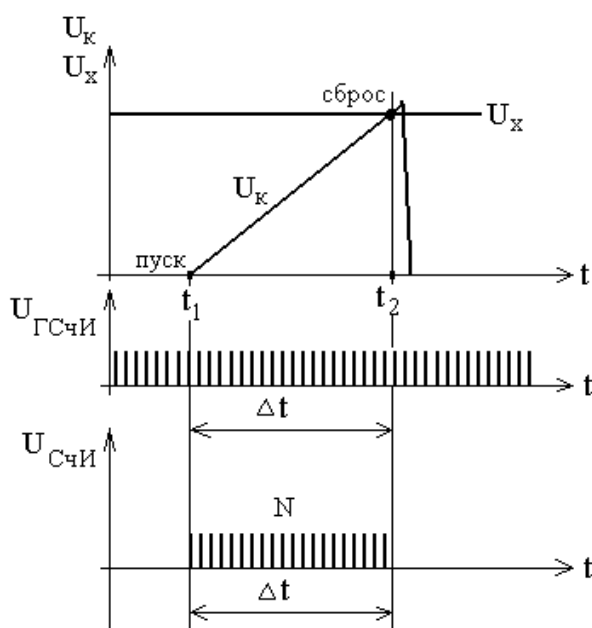


Рис. 61. Временные диаграммы времяимпульсного вольтметра

Вх.У – входное устройство (регулируемый делитель, служит для изменения пределов измерения). Измеряемое напряжение U_x через Вх.У поступает на схему сравнения СС (компаратор). На СС от ГПН подается пилообразное компенсирующее напряжение U_k . В момент времени t_1 (начало счета) блок управления БУ запускает ГПН и открывает электронный ключ ЭК, через который от генератора счетных импульсов ГСЧИ на счетчик импульсов СЧИ поступают импульсы стабильной частоты (частота их порядка 1 МГц).

В момент времени t_2 , когда $U_x = U_k$, ЭК закрывается, счетчик СЧИ прекращает подсчет импульсов (конец счета). Число импульсов N за время Δt пропорционально U_x , $N(\Delta t) \sim U_x$.

Цифровой индикатор ЦИ представляет результат измерения в десятичной системе.

Погрешность таких приборов зависит от линейности ГПН, стабильности ГСЧИ, чувствительности СС. Кроме того, такие ЦИП подвержены влиянию помех (требуется специальная защита).

Электронный цифровой вольтметр с частотноимпульсным преобразованием (интегрирующий)

С целью снижения влияния помех в измеряемом напряжении на точность измерения, применяют интегрирующие вольтметры, измеряющие вместо мгновенного значения напряжения его среднее арифметическое значение за период:

$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T (U_X + U_{МП} \sin \omega t) dt = U_X.$$

($U_{МП} \sin \omega t = 0$).

Измеряемое напряжение U_X с помехой $U_{П}$ (амплитудой $U_{МП}$) – рис. 62.

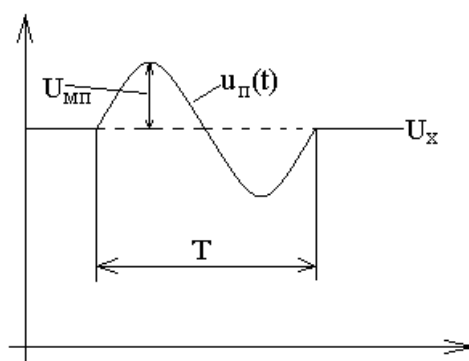


Рис. 62. Напряжение с помехой

Очевидно, что симметричная помеха $U_{П}$ не влияет на результат измерений.

Структурная схема прибора изображена на рис. 63.

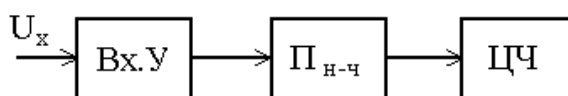


Рис. 63. Структурная схема интегрирующего вольтметра

Вх.У – входное устройство.

П_{н-ч} – преобразователь напряжения в частоту, преобразует U_X в импульсы определенной частоты, $f=k \cdot u(t)$, где $u(t)$ – входное напряжение.

Импульсы поступают в счетчик цифрового частотомера ЦЧ. Среднее значение частоты следования импульсов за интервал, кратный периоду помехи T , будет равно частоте, соответствующей напряжению без помехи:

$$f_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T f dt = \frac{k}{T} \int_0^T u(t) dt = k U_X .$$

Электронный цифровой вольтметр с двойным интегрированием

Принцип его работы подобен принципу времяимпульсного преобразования, но здесь образуются два временных интервала в течение цикла измерения, длительность же цикла измерения устанавливается кратной периоду помехи. Это приводит к существенному повышению помехоустойчивости вольтметров. В цифровом вольтметре с двойным интегрированием преобразование U_X в пропорциональный ему интервал времени T_X осуществляется путем интегрирования сначала измеряемого U_X , а затем опорного $U_{оп}$ напряжений (см. временную диаграмму).

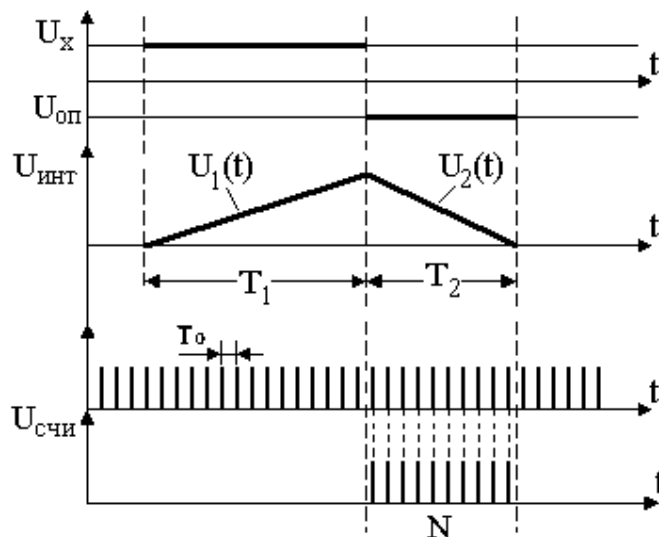


Рис. 64. Временные диаграммы вольтметра с двойным интегрированием

В первом такте в течение времени T_1 производится интегрирование входного напряжения U_X , в результате чего напряжение на выходе интегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_X dt = \frac{U_X}{RC} t,$$

где RC – постоянная времени интегратора; t – время.

В конце интервала интегрирования напряжение на выходе интегратора равно $\frac{U_X T_1}{RC}$. В момент t_1 напряжение U_X отключается от

интегратора и на вход интегратора подается опорное напряжение $U_{оп}$, имеющее противоположную по отношению к U_x полярность. Интегрирование опорного напряжения продолжается до тех пор, пока выходное напряжение интегратора снова не станет равным нулю. Поэтому в течение времени второго такта напряжение на выходе интегратора равно

$$U_2(t) = \frac{U_x T_1}{RC} - \frac{1}{RC} \int_0^{T_x} U_{оп} dt = \frac{U_x T_1}{RC} - \frac{U_{оп} t}{RC},$$

а в конце этого периода

$$U_2(t) = \frac{U_x T_1}{RC} - \frac{U_{оп} T_x}{RC} = 0,$$

откуда

$$T_x = \frac{T_1}{U_{оп}} U_x.$$

Число импульсов, подсчитанное счетчиком импульсов, равно

$$N_x = \frac{T_1 f_0}{U_{оп}} U_x,$$

где f_0 – частота счетных импульсов.

Временной интервал T_x , пропорциональный U_x , не зависит от постоянной времени интегратора RC , а зависит только от T_1 и $U_{оп}$, которые могут поддерживаться постоянными с высокой точностью.

Практически все современные цифровые вольтметры строятся на основе метода двойного интегрирования. Вольтметры этого типа обеспечивают погрешность измерения 0,02...0,005%.

Электронные цифровые вольтметры с комбинированным преобразованием

Эти приборы сочетают кодоимпульсный и частотноимпульсный принципы аналого-цифрового преобразования. Измеряемое напряжение U_x преобразуется в частоту, частота в напряжение, которое измеряется по кодоимпульсному принципу.

Цифровые вольтметры переменного тока

Вольтметры переменного тока строятся по принципу:

а). Преобразование переменного напряжения в постоянное, которое измеряется вольтметром постоянного тока, $U_- = F(U_~)$.

б). Переменное напряжение преобразуется в частоту следования импульсов, измеряемую счетчиком импульсов, $N = F(f) = F_1(U_~)$.

Основной вариант – «а».

Главной особенностью при этом является принцип преобразования значения переменного напряжения в постоянное. Возможны три варианта:

$$U_m \sim U_- ; U_{cp} \sim U_- ; U \sim U_- .$$

Лучшим является вариант преобразования действующего значения переменного напряжения в постоянное, $U_- \sim kU$; при этом отсутствует погрешность от изменения формы кривой измеряемого напряжения.

Цифровой (электронно-счетный) частотомер

Структурная схема ЭСЧ представлена на рис. 65.

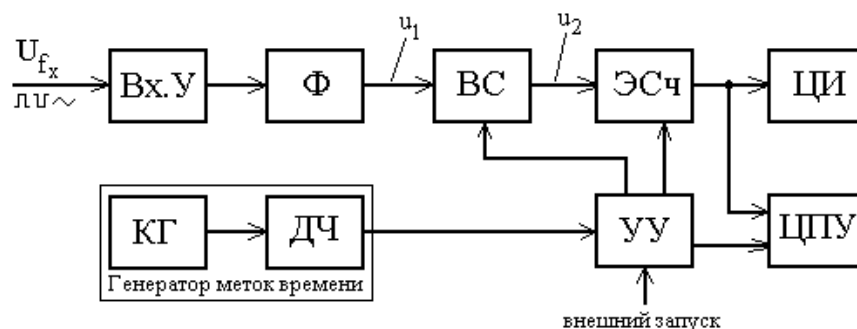


Рис. 65. Структурная схема ЭСЧ

Принцип действия ЭСЧ основан на подсчете числа импульсов N , соответствующих числу периодов сигнала неизвестной частоты f_x за известный интервал времени $T_{\text{и}}$ (время измерения).

Если за время $T_{\text{и}}$ подсчитано N импульсов, то $f_x = N/T_{\text{и}}$. Если $T_{\text{и}} = 1$ с, то $f_x = N$. Временные диаграммы работы ЭСЧ представлены на рис. 66.

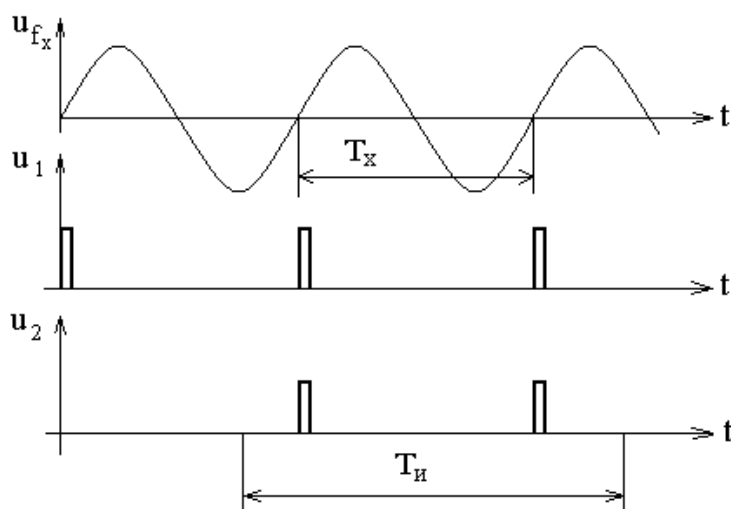


Рис. 66. Временные диаграммы работы ЭСЧ

Вх.У – входное устройство – усилитель с полосой пропускания 10 Гц – 3,5 МГц, и аттенюатор.

Ф – формирователь – преобразует периодический сигнал неизвестной частоты в последовательность однополярных импульсов

постоянной амплитуды с большой крутизной фронтов; частота следования этих импульсов равна измеряемой частоте.

ВС – временной селектор – электронный ключ с двумя входами.

УУ – устройство управления.

ВС открывается строб-импульсом, вырабатываемым УУ, на время $T_{и}$ и пропускает импульсы на электронный счетчик ЭСЧ. Цифровой индикатор ЦИ обеспечивает индикацию результата измерения в единицах частоты (Гц).

Генератор меток времени состоит из кварцевого генератора КГ, вырабатывающего импульсы частотой 1 МГц, и делителя частоты ДЧ (делит частоту КГ декадными степенями, т.е. до 100, 10, 1 кГц, 100, 10, 1, 0,1, 0,01 Гц). Полученные после ДЧ частоты используются для формирования в УУ меток времени $T_{и}$, равных соответственно 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 1, 10, 100 с. Импульсы измеряемой частоты поступают на электронный счетчик только тогда, когда ко входу ВС от УУ приложен импульс длительностью $T_{и}$. С выхода счетчика информация о числе заполнивших его импульсов N в виде двоичного кода подается через дешифратор на ЦИ, на котором фиксируется результат измерения в единицах частоты. Измерение производится повторяющимися циклами, задаваемыми УУ.

УУ управляет процессом измерения и обеспечивает регулируемое время индикации результатов измерения (0,3÷5 с), сброс счетных декад и других схем в «нулевое» состояние перед каждым измерением, режимы ручного, автоматического и внешнего запуска, импульсы запуска ЦПУ и открытия ВС.

Особенность последовательного счета импульсов состоит в увеличении погрешности при уменьшении частоты. Относительная погрешность ЭСЧ определяется выражением

$$\delta = \delta_0 + \delta_{нест} + \frac{1}{f_{изм} T_{и}},$$

где δ_0 – относительная погрешность установки частоты КГ;

$\delta_{\text{нест}}$ – относительная погрешность, вызванная нестабильностью частоты КГ;

$1/f_{\text{изм}}T_{\text{и}}$ – относительная погрешность, обусловленная некрatностью периодов $T_{\text{изм}}$ и $T_{\text{и}}$. Данная составляющая возникает из-за несовпадения моментов появления счетных импульсов относительно фронта и спада строб-импульса. При некрatности $T_{\text{изм}}$ и $T_{\text{и}}$ величина погрешности зависит от взаимного расположения $T_{\text{изм}}$ и $T_{\text{и}}$, т.е. несовпадения моментов их появления, при этом максимальная абсолютная погрешность счета импульсов равна ± 1 младшего разряда счета.

При измерении периода $T_{\text{изм}}$ входной сигнал через ВхУ и Ф поступает на УУ, которое формирует строб-импульс с периодом $T_{\text{с-и}} = T_{\text{изм}} = T_{\text{и}}$, счетчик подсчитывает число прошедших за это время импульсов образцовой частоты $f_0 = 1/T_0$ КГ, и

$$T_{\text{изм}} = NT_0,$$

$$f_{\text{изм}} = 1/T_{\text{изм}} = 1/(NT_0) = f_0/N.$$

Цифровые измерители интервалов времени

Временной интервал может задаваться периодическими, непериодическими, однократными сигналами, импульсами с выходов различных приборов, интервалом между двумя импульсами, и т.д. Отсюда следует необходимость иметь в приборе два входных формирующих устройства – «стартовый» и «стоповый».

Измеритель ИВ с преобразованием интервала в пропорциональное ему число импульсов

Структурная схема прибора представлена на рис. 67.

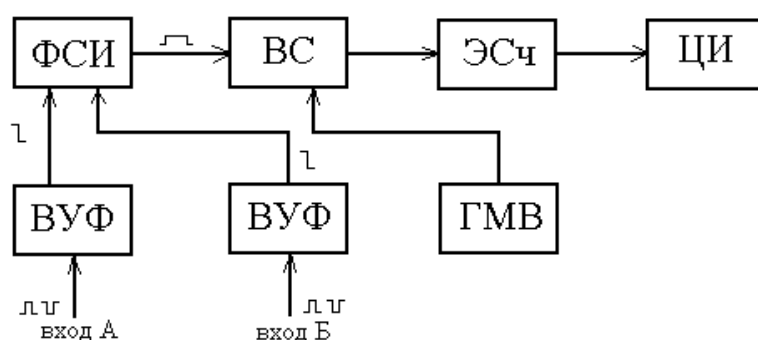


Рис. 67. ИИВ с преобразованием интервала в число импульсов

Импульсы, между которыми измеряется интервал времени, поступают на входы А и Б.

ВУФ – входной усилитель-формирователь, импульсы с ВУФ подаются на ФСИ – формирователь строб-импульса. Длительность строб-импульса равна измеряемому интервалу времени t_x . Строб-импульс длительностью t_x поступает на ВС – временной селектор, открывает его, и на электронный счетчик ЭСЧ от генератора меток времени ГМВ поступают импульсы (метки) с периодом следования T_0 . Количество импульсов N подсчитывается,

$$T_x = NT_0.$$

Относительная погрешность измерения t_x

$$\gamma_t = \pm [\gamma_r + (T_0/t_x)] \cdot 100\%,$$

где γ_r – относительная погрешность частоты генератора опорной частоты;

T_0 – период следования меток времени;

t_x – измеряемый интервал времени.

При измерении длительности импульса t_i он подается одновременно на входы А и Б; процесс измерения аналогичен.

Измеритель ИВ с преобразованием масштаба времени

Здесь t_x преобразуется в импульс, амплитуда которого пропорциональна длительности этого интервала, а затем амплитуда вновь преобразуется во временной интервал t_x' , длительность которого пропорциональна амплитуде и в k раз больше длительности t_x :

$$t_x' = k \cdot t_x.$$

Структурная схема прибора представлена на рис. 68.

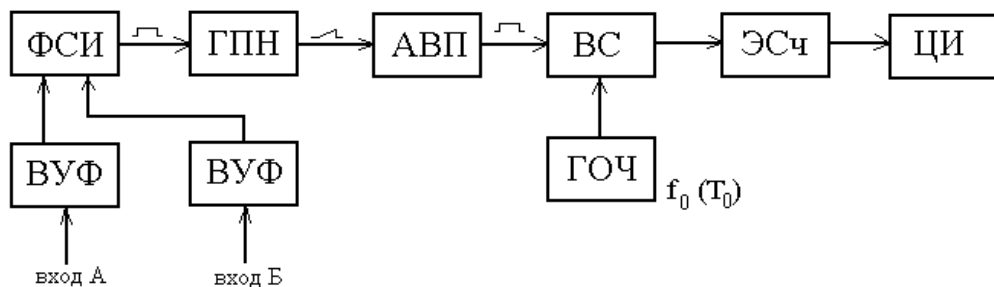


Рис. 68. Измеритель ИВ с преобразованием масштаба времени

Стартовый и стоповый импульсы поступают на вход ФСИ, строб-импульс длительностью t_x запускает генератор пилообразного напряжения, задний фронт строб-импульса прекращает нарастание пилообразного напряжения. Амплитуда пилы пропорциональна t_x .

АВП – амплитудно-временной преобразователь, преобразует амплитуду в пропорциональное время t_x' . С его выхода импульс $t_x' = k \cdot t_x$

поступает на временной селектор ВС, открывает его и счетчик ЭСч подсчитывает число импульсов генератора образцовой частоты ГОЧ за этот интервал времени.

Искомый интервал времени

$$t_X = t_X' / k = NT_0 / k.$$

Цифровой (электронно-счетный) фазометр

Структурная схема прибора совпадает со схемой измерителя ИВ с преобразованием интервала в пропорциональное число импульсов (рис. 67). Временные диаграммы работы фазометра представлены на рис. 69.

В основе работы – преобразование двух напряжений u_1 и u_2 , между которыми измеряется фазовый сдвиг, в периодические последовательности коротких импульсов, соответствующих моментам перехода этих напряжений через нуль с производными одинакового знака (т.е. в моменты перехода от минуса к плюсу или наоборот). Интервал времени ΔT между ближайшими импульсами u_1 и u_2 пропорционален фазовому сдвигу, $\Delta T \sim \varphi$.

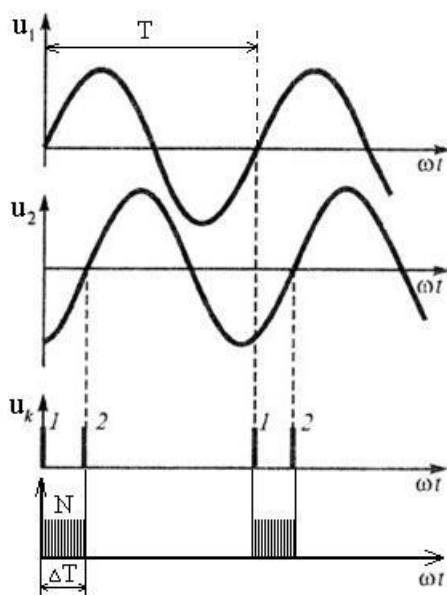


Рис. 69. Временные диаграммы цифрового фазометра

Фазовый сдвиг определится по формуле

$$\varphi^{\circ} = 360 \Delta T / T.$$

Время открытого состояния временного селектора ВС определяется интервалом ΔT .

Цифровой RC-измеритель

В основе работы прибора – преобразование измеряемого параметра в пропорциональный интервал времени и измерение этого интервала путем заполнения его счетными импульсами. Для этого используются закономерности апериодического процесса, возникающего при подключении заряженного конденсатора или индуктивности к образцовому резистору. При измерении активного сопротивления используется процесс разряда образцового конденсатора через измеряемый резистор. Структурная схема цифрового RC-измерителя приведена на рис. 70, временные диаграммы – на рис. 71.

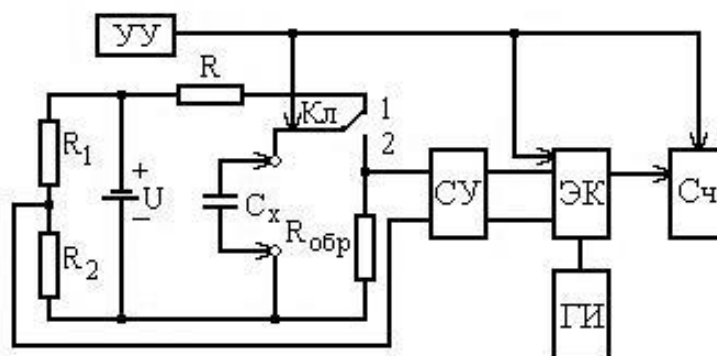


Рис. 70. Структурная схема цифрового RC-измерителя

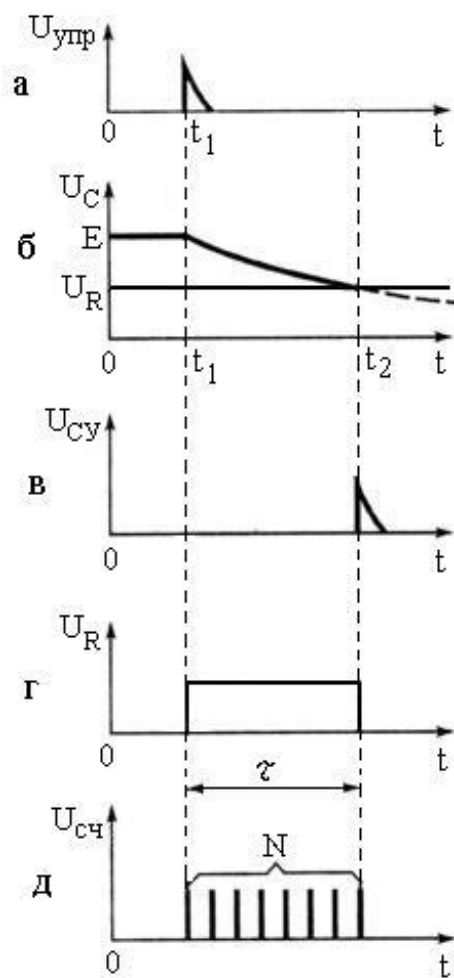


Рис. 71. Временные диаграммы прибора при измерении емкости

Перед началом измерения ключ Кл находится в положении 1 и конденсатор C_X заряжается до напряжения источника U через ограничительный резистор R .

В момент начала измерения t_1 (рис. 71, а) управляющее устройство УУ вырабатывает импульс, сбрасывающий счетчик импульсов Сч, открывает электронный ключ ЭК и переводит ключ Кл в положение 2. Конденсатор C_X начинает разряжаться через образцовый резистор R_{OBR} по экспоненциальному закону (рис. 71, б)

$$U_C = U \cdot e^{-(t-t_1)\tau}$$

где $\tau = R_{OBR}C_X$ – постоянная времени цепи разряда.

В момент t_1 импульсы генератора импульсов ГИ частотой f_0 начинают поступать на вход счетчика импульсов Сч. Через интервал времени τ напряжение на конденсаторе принимает значение

$$U_c = \frac{U}{e} = 0,37U .$$

Напряжение U_c подается на один из входов сравнивающего устройства СУ, ко второму входу подводится напряжение U_R , снимаемое с резистора R_2 . Если подобрать сопротивления делителя R_1 и R_2 так, что $U_R=0,37U$, то в момент t_2 будет $U_c=U_R$, на входе СУ возникает второй импульс, который закрывает ЭК и Сч прекращает подсчет импульсов (рис. 71, в).

Если за время $t_2-t_1=\tau$ на Сч поступило N импульсов, то $N=f_0\tau$.

Так как $\tau = R_{OBR}C_X$, то при фиксированных значениях f_0 и R_{OBR}

$$C_X = \frac{N}{R_{OBR}f_0} = KN ,$$

т.е. $C_X \sim$ показанию счетчика, и счетчик может быть отградуирован в единицах емкости.

При наличии образцового конденсатора C_{OBR} можно аналогичным образом измерить сопротивление резистора

$$R_X = \frac{N}{C_{OBR}f_0} = KN .$$

Рассмотренные приборы, реализующие метод дискретного счета, обеспечивают сравнительно малую погрешность измерения (0,1...0,2%). Недостаток – невозможность измерения на рабочей частоте.