

2 ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

2.1 Классификация средств измерений

2.2 Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование

2.3 Измерение тока и напряжения.

2.3.1 Измеряемые параметры тока и напряжения.

2.3.2 Общие сведения об электромеханических приборах

2.3.3 Магнитоэлектрические измерительные приборы

2.3.4 Измерение тока на радиочастотах

2.3.5 Выпрямительные амперметры

2.3.6 Термоэлектрические амперметры

2.3.7 Фотоэлектрические амперметры

2.3.8 Расширение пределов измерения силы тока

2.3.9 Методическая погрешность при измерении силы тока

2.3.10 Измерение напряжения электронными аналоговыми

вольтметрами.

2.3.10.1 Аналоговые вольтметры прямого преобразования

2.3.10.2 Вольтметры переменного напряжения

2.3.10.3 Аналоговые вольтметры сравнения

2.3.11 Расширение пределов измерения напряжения

2.3.12 Методическая погрешность при измерении напряжения

2.3.13 Зависимость показаний вольтметров от формы кривой измеряемого напряжения

2.3.14 Измерение постоянного напряжения цифровыми вольтметрами

2.3.14.1 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием

2.3.14.2 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с частотно-импульсным преобразованием

2.3.14.3 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с кодо-импульсным преобразованием

2.3.15 Цифровые вольтметры переменного напряжения

2.4 Измерение частоты электромагнитных колебаний

2.4.1 Классификация приборов для измерения частоты и интервалов времени

2.4.2 Резонансные частотомеры

2.4.3 Измерение частоты гетеродинным методом

2.4.4 Метод дискретного счета. Электронно-счетные частотомеры

2.5 Исследование формы электрических сигналов

2.5.1 Типовой универсальный электронный осциллограф (ЭО)

2.5.2 Цифровые осциллографы

2.5.3 Осциллографические измерения

2.5.3.1 Измерение напряжений

2.5.3.2 Измерение временных параметров и параметров импульсов

2.5.3.3 Измерение частоты

2.5.3.4 Измерение фазовых сдвигов

2.6 Измерение параметров цепей с сосредоточенными постоянными

2.6.1 Метод вольтметра – амперметра

2.6.1.2 Измерение емкости

2.6.1.3 Измерение индуктивности

2.6.2 Метод непосредственной оценки

2.6.3 Мостовой метод измерения параметров цепей. Измерительные

МОСТЫ

2.6.3.1 Измерительные мосты постоянного тока

2.6.3.2 Измерительные мосты переменного тока

2.6.4 Резонансный метод измерения параметров цепей

2.6.5 Метод дискретного счета

2.7 Измерение фазового сдвига

2.7.1 Метод суммы и разности напряжений

2.7.2 Нулевой метод

2.7.3 Метод преобразования фазовых сдвигов во временной интервал

2.8 Измерительные генераторы

2.9 Принципы автоматизации измерений

2 ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ

2.1 Классификация средств измерений

Средства измерений (СИ), применяемые для измерения характеристик электрических сигналов и параметров радиотехнических цепей можно условно разделить на две большие группы: **электромеханические и электронные измерительные приборы (ИП)**.

Электромеханические приборы, как правило, состоят из относительно простой измерительной цепи и измерительного механизма.

Измерительная цепь – это совокупность элементов СИ, образующих непрерывный путь прохождения измерительного сигнала одной физической величины от входа до выхода.

Измерительную цепь измерительной системы называют **измерительным каналом**.

Измерительный механизм СИ – совокупность элементов СИ, которые обеспечивают необходимое перемещение указателя (стрелки, светового пятна и т.д.). Он состоит из механических и электрических элементов (пружин, катушек, магнитов), взаимодействие которых вызывает взаимное перемещение.

В состав **электронных ИП** входят электронные устройства: усилители, счетчики, дешифраторы, электронные ключи и т.п.

Каждый ИП имеет отсчетное устройство, которое позволяет производить отсчет измеряемой величины. Измерительная информация может быть представлена в цифровой или аналоговой форме.

В зависимости от способа обработки и представления информации ИП делятся на **аналоговые и цифровые**.

В **аналоговых ИП** выходные сигналы, а следовательно, и показания являются непрерывными функциями изменения измеряемой величины. В **цифровых ИП** вырабатываются дискретные сигналы измерительной информации, а показания представляются в цифровой форме.

Электронные ИП по характеру измерений и виду измеряемой величины делятся на 20 подгрупп, которым присваиваются буквенные обозначения:

- А – приборы для измерения силы тока;
- В - приборы для измерения напряжения;
- Е - приборы для измерения параметров и компонентов цепей с сосредоточенными постоянными;
- М - приборы для измерения мощности;
- Р - приборы для измерения параметров элементов и трактов с распределенными постоянными;
- Ч - приборы для измерения частоты и времени;
- Ф - приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания;
- С - приборы для исследования формы сигнала и спектра;
- Х – приборы для наблюдения и исследования характеристик радиоустройств;
- И – приборы для импульсных измерений;
- П - приборы для измерения напряженности поля и радиопомех;
- У – усилители измерительные;
- Г – генераторы измерительные;
- Д – аттенюаторы и приборы для измерения ослабления;
- К – комплексные измерительные установки;
- Л – приборы для измерения параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов;
- Ш – приборы для измерения электрических и магнитных свойств материалов;
- Э – измерительные устройства коаксиальных и волноводных трактов;
- Я – блоки радиоизмерительных приборов;
- Б – источники питания для измерений и радиоизмерительных приборов.

В подгруппах приборы по признакам основной выполняемой функции разделяются на **виды**. Вид **СИ** – совокупность СИ, предназначенных для измерения данной физической величины. Вид СИ обозначается арабской цифрой после буквы, обозначающей вид. Например, В2 – вольтметры постоянного тока, В3 – вольтметры переменного тока, В7 – универсальные вольтметры.

Приборы каждого вида по совокупности технических характеристик и очередности разработок разделяются на **типы**, которым присваивается порядковый номер модели: В7-28. Тип **СИ** – совокупность СИ одного и того же назначения, основанных на оном и том же принципе действия, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одной и той же технической документации. Для **модернизированных приборов** после цифры,

обозначающей тип, ставятся в алфавитном порядке буквы русского алфавита, соответствующие очередной модернизации: В7-28А. **Конструктивная**, но не электрическая модернизация обозначается цифрой после косой черты: В7-28А/1. Для **комбинированных приборов** после буквы, обозначающей подгруппу, ставится буква К: ФК2-18 – прибор для измерения фазовых сдвигов и параметров четырехполюсников. Для приборов, предназначенных для работы в тропическом климате, после обозначения типа ставится буква Т.

Обозначения **электромеханических приборов** состоят из букв, которые в основном соответствуют типу прибора, и цифр (М, Э и т.п.).

В зависимости от формы представления показаний приборы делятся на **показывающие**, допускающие только отсчет показаний, и **регистрирующие**, в которых возможен не только отсчет, но и регистрация показаний в форме диаграмм (самопишущие приборы) или распечатки (печатающие).

По условиям применения ИП делятся на три группы:

1) **приборы общего применения**, предназначенные для использования в различных радиотехнических устройствах независимо от их назначения;

2) **приборы специальные (сервисные)**, узкого назначения, предназначенные для измерения параметров сигналов в определенных устройствах (объектах);

3) **приборы встроенные**, конструктивно входящие в состав радиоэлектронных устройств.

Некоторые ИП можно использовать в качестве всех трех (например, электронные вольтметры, генераторы).

Вся совокупность ИП **по назначению** условно разбивается на три основные группы:

1) приборы для измерения параметров и характеристик электрических сигналов (подгруппы А, В, М, Ч, С, ...);

2) приборы для измерения параметров и характеристик электрических цепей (измерители сопротивления, индуктивности, емкости – Е, Р и др.);

3) источники измерительных сигналов – измерительные генераторы (Г).

Важным классификационным признаком является **принцип действия** в соответствии с используемым методом измерений. По этому признаку различают

- приборы прямого преобразования (действия);

- приборы сравнения (компенсационного преобразования).

Прибором прямого преобразования называется ИП, в котором происходит одно или несколько преобразований входного сигнала в одном направлении. Его структурная схема представлена на Рисунке 2.1.

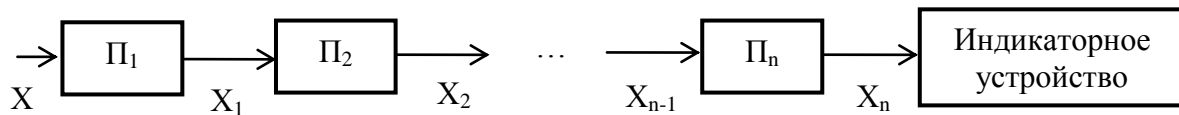


Рисунок 2.1 – Структурная схема ИП прямого преобразования.

Тип индикаторного устройства (ИУ) определяется принадлежностью. Прибора к той или иной группе (аналоговой, цифровой, показывающий или регистрирующий).

Входной сигнал X последовательно преобразуется в выходной X_n , который отображается на ИУ или используется при дальнейшей обработке.

Прибором сравнения называется ИП, предназначенный для непосредственного сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно (мерой). Известная величина воспроизводится с помощью меры или набора мер. Структурная схема прибора сравнения представлена на Рисунке 2.2.

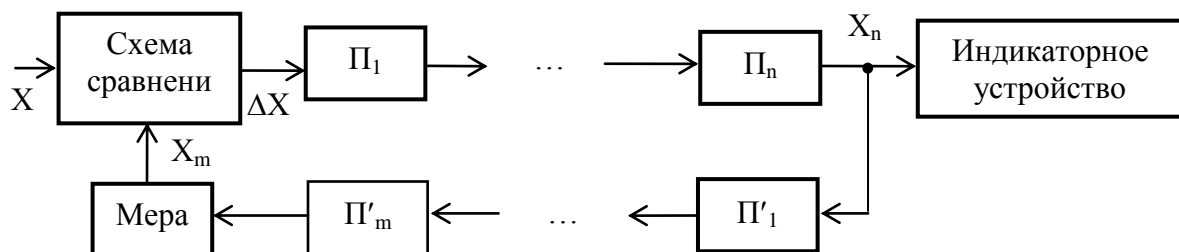


Рисунок 2.2 – Структурная схема ИП сравнения.

В ИП сравнения измеряемая величина X подвергается прямому преобразованию в преобразователях Π_1, \dots, Π_n , и по цепи обратной связи сигнал X_n через преобразователи Π'_1, \dots, Π'_m управляет значением меры.

При полной компенсации сигналов в схеме сравнения в установившемся режиме $\Delta X = X - X_m = 0$. Изменением коэффициента передачи цепи обратного преобразования добиваются нулевых показаний ИУ. Значение измеряемой величины в этом случае будет равно значению меры X_m . Такая модификация метода сравнения получила название **нулевого метода**.

Другой разновидностью метода сравнения является **дифференциальный метод**. В этом случае в установившемся режиме $\Delta X = X - X_m \neq 0$. С помощью ИУ фиксируется величина ΔX , а измеряемая величина будет равна $X = X_m + \Delta X$.

К приборам сравнения можно отнести измерительные мосты, потенциометры, некоторые виды вольтметров.

2.2 Метрологические характеристики средств измерений и их нормирование

Все характеристики СИ можно разделить на две группы: метрологические и технические.

Метрологическая характеристика – это характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерения и на его погрешность.

Метрологические характеристики регламентируются следующими документами:

ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия;

ГОСТ 8.009-84 ГСИ Нормируемые метрологические характеристики средств измерений;

ГОСТ 24314-80 Приборы электронные измерительные. Термины и определения. Способы выражения погрешностей и общие условия испытаний.

К основным метрологическим характеристикам СИ относятся чувствительность, входной импеданс, вариация показаний, динамические характеристики, погрешность СИ, выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда.

Чувствительность СИ – свойство СИ, определяемое отношением изменения выходного сигнала этого средства к вызывающему его изменению измеряемой величины:

$$S_{\Pi} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}. \quad (2.1)$$

На практике используется такая метрологическая характеристика, связанная с чувствительностью, как **цена деления шкалы** (постоянная прибора) – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИ.

Для равномерной шкалы $C_{\Pi} = 1/S_{\Pi}$.

Если шкала прибора неравномерная, т.е. в пределах шкалы цена деления меняется, то нормируется минимальная цена деления.

Иногда в качестве характеристики используется **порог чувствительности** (предельная чувствительность) - характеристика СИ в виде наименьшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться ее изменение данным средством.

Входной импеданс ($Z_{вх}$) определяет влияние СИ на работу исследуемой схемы. За счет потребления некоторой мощности СИ может изменить режим работы маломощного источника входного сигнала, что приводит к появлению методической погрешности.

Входной импеданс характеризуется активной и реактивной составляющими. Часто в качестве параметров входа СИ указывается значение **входного активного сопротивления и входной емкости**.

На постоянном токе и в диапазоне низких частот нормируется входное активное сопротивление.

Вариация показаний ИП (выходного сигнала измерительного преобразователя) – это разность показаний прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины.

В высокочувствительных (особенно электронных) ИП вариация показаний приобретает иной смысл и может быть определена как колебание их показаний около среднего значения.

Например, для амперметра вариация показаний $\mathbf{b} = |\mathbf{I}_m - \mathbf{I}_6|$ при подходе к данной точке со стороны меньших \mathbf{I}_m и больших \mathbf{I}_6 значений тока.

Динамические характеристики – это характеристики инерционных свойств СИ. Они определяют зависимость параметров выходного сигнала СИ от меняющихся во времени величин: параметров входного сигнала. Нагрузки, внешних факторов.

Динамические характеристики могут нормироваться

- функцией связи между входными и выходными сигналами (передаточной функцией, переходной характеристикой и т.п.);
- графиками (таблицами) амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик;
- временем установления показаний или быстродействием СИ – величиной, обратной времени установления показаний.

Погрешность СИ может быть представлена в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей или класса точности.

Погрешность СИ может быть представлена в форме абсолютной, относительной и приведенной погрешностей или класса точности.

Класс точности средства измерений - это обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также другими свойствами средства измерения, влияющими на точность, значения которой устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Значение класса точности выбирается из ряда

$(1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6) \times 10^n$, где $n = -1, 0, 1, 2, \dots$

Способ обозначения класса точности определяется формой выражения основной погрешности. Обозначение класса точности зависит от того, в какой форме представлены погрешности средства измерений.

Примеры обозначения класса точности

Погрешность СИ	Способ выражения	Обозначение на шкале СИ	Значение погрешности СИ
Абсолютная (Δ_n)	<ul style="list-style-type: none"> - одним значением $\Delta_n = \pm a$ для аддитивной погрешности; $\Delta_n = \pm(a + bX)$ для мультипликативной погрешности, где a, b – постоянные величины; - таблицы, графики (для разных поддиапазонов) 	<p style="text-align: center;">С</p> <p style="text-align: center;">Г_У</p> <p style="text-align: center;">А₂</p>	Значения указываются в нормативно-технической документации
Относительная (δ_n)	<ul style="list-style-type: none"> - одним значением $\delta_{II} = \frac{\Delta_{II}}{X} \cdot 100\% = \pm q,$ для аддитивной погрешности; - значением $\delta_{II} = \pm[c + d(\frac{X_k}{X} - 1)]$ для мультипликативной погрешности, где X_k – конечное значение диапазона, <li style="padding-left: 20px;">$c = b + d,$ <li style="padding-left: 20px;">$d = a/X_k;$ - таблицей, графиком 	<p style="text-align: center;">(2,0)</p> <p style="text-align: center;">0,02/0,01</p> <p style="text-align: center;">D</p> <p style="text-align: center;">G₁</p> <p style="text-align: center;">III</p>	<p style="text-align: center;">$\delta = \pm 2,0 \%$</p> <p style="text-align: center;">$c = 0,02; d = 0,01$</p> <p>Значения указываются в нормативно-технической документации</p>
Приведённая (γ) (применяется, если диапазон измерения включает ноль)	<ul style="list-style-type: none"> $\gamma_{II} = \frac{\Delta_{II}}{X_N} \cdot 100\% = \pm p,$ где $p = const:$ - X_N выражено в единицах измеряемой величины; - X_N выражено в длине рабочей части шкалы 	<p style="text-align: center;">2,5</p> <p style="text-align: center;">2,5</p>	<p style="text-align: center;">$\gamma = \pm 2,5 \%$</p> <p style="text-align: center;">$\gamma = \pm 0,5 \%$</p>

Для приборов с цифровым отсчетом нормируются **выходной код, число разрядов кода и номинальная цена единицы наименьшего разряда.**

В технических описаниях приборов обычно указывают параметры, которые можно объединить в группу количественных характеристик, определяющих **область применения**. Она характеризуется совокупностью допустимых диапазонов трех групп физических величин:

- **диапазона возможных значений измеряемых величин** (информативных параметров) или **пределов шкалы ИП**. Здесь можно выделить два понятия: **диапазон показаний СИ** – область значений шкалы прибора, ограниченную начальным и конечным значением шкалы, - и **диапазон измерений СИ** – область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИ;

- **диапазона возможных значений неизмеряемых величин** (неинформативных параметров), например, для вольтметра переменного напряжения – частотного диапазона;

- **диапазона возможных значений влияющих величин** (диапазона температур, внешних полей, ускорений и т.п.).

Технические характеристики средств измерений.

В технической документации каждого СИ обычно указывается его **назначение**, то есть основные функции СИ и область его применения. Характеристика назначения может включать в себя предельные значения неинформативных параметров и рабочие условия применения СИ.

Метрологическая исправность СИ – состояние СИ, при котором все его нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям.

Надежность СИ – свойство измерительной техники функционировать при сохранении метрологических и других характеристик в заданных пределах и режимах работы.

Метрологическая надежность СИ – надежность СИ в части сохранения его метрологической исправности.

При выходе метрологических характеристик СИ за установленные пределы наступает **метрологический отказ СИ**.

Надежность СИ характеризуется следующими **показателями**:

- **безотказность** – свойство СИ сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов. Ее характеризует **наработка на отказ** – среднее значение наработки СИ между двумя отказами. Для СИ электрических и магнитных величин, разработанных после 01.01.84 г. Нарботка на отказ должна составлять не менее 1000 часов.

- **долговечность** – свойство СИ сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания ремонтов. Она характеризуется вероятностью отсутствия скрытых, неявных отказов за межповерочный интервал. Средний срок службы ИП должен составлять не менее 8 лет, средний ресурс – не менее 5000 часов.

- **ремонтпригодность** – приспособленность СИ к проведению технического обслуживания и ремонта. Ее характеризует **среднее время восстановления** – от 10 мин. до 96 часов.

- **сохраняемость** – способность СИ сохранять метрологические характеристики при хранении, транспортировке.

В зависимости от значений влияющих величин, характеризующих климатические и механические воздействия в рабочих условиях применения, а также предельные условия транспортирования, СИ делятся на 7 групп. Большому номеру группы СИ соответствуют более жесткие условия применения и транспортирования.

В нормативно-технической документации на СИ устанавливают также требования к электропитанию, ко времени установления рабочего режима и продолжительности непрерывной работы, к электрической прочности и сопротивлению изоляции, требования безопасности.

2.3 Измерение тока и напряжения.

2.3.1 Измеряемые параметры тока и напряжения.

При синусоидальной форме сигнала аналитическое выражение будет иметь вид

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi); \quad u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.2)$$

где i, u – мгновенные значения силы тока и напряжения;

I_m, U_m – максимальное значение из всех мгновенных значений за период или полупериод (пиковое, или амплитудное, значение);

ωt – фаза;

φ – начальная фаза.

Большинство электромеханических приборов реагирует на **средне-выпрямленное значение тока (напряжения)** – среднее арифметическое абсолютных мгновенных значений за период:

$$I_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |i| dt; \quad U_{св} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt, \quad (2.3)$$

где T – период измеряемого сигнала.

В технике переменных токов часто приходится иметь дело с тепловым и механическим воздействием тока. Количество теплоты и механическая сила зависят от квадрата мгновенного значения тока (напряжения), называемого **среднеквадратическим значением тока (напряжения)**:

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}; \quad U_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}. \quad (2.4)$$

Связь между пиковым и среднеквадратическим значениями устанавливается с помощью **коэффициента амплитуды**

$$k_a = \frac{I_m}{I_{ск}} = \frac{U_m}{U_{ск}}. \quad (2.5)$$

Связь между среднеквадратическим и среднев्यпрямленным значениями тока (напряжения) устанавливает коэффициент формы

$$k_{\phi} = \frac{I_{ск}}{I_{св}} = \frac{U_{ск}}{U_{св}}. \quad (2.6)$$

Иногда для удобства расчетов вводят коэффициент усреднения

$$k_y = k_a \cdot k_{\phi} = \frac{I_m}{I_{св}} = \frac{U_m}{U_{св}}. \quad (2.7)$$

Эти коэффициенты позволяют определить любой параметр переменного напряжения, если известен один из параметров и форма напряжения.

Кроме сигналов синусоидальной формы, в радиотехнике широко используются сигналы несинусоидальной формы. Характеристиками таких сигналов, кроме среднеквадратического и среднев्यпрямленного значений, являются максимальное, минимальное и среднее (постоянная составляющая) значения сигнала.

Необходимой предпосылкой правильного выбора прибора и метода измерения тока (напряжения) является знание частоты, формы, ожидаемого значения измеряемой величины и ряда других характеристик.

Для измерения тока и напряжения используются методы непосредственной оценки и сравнения.

3.3.2 Общие сведения об электромеханических приборах

Основным элементом электромеханического прибора является **электромеханический измерительный механизм**. Он предназначен для преобразования электрической энергии в механическую энергии перемещения подвижной части (чаще всего угловое) показывающего или регистрирующего прибора.

В зависимости от принципа действия (по способу преобразования электрической энергии в механическую) различают следующие основные системы измерительных механизмов (ИМ):

- магнитоэлектрические измерительные механизмы (МЭИМ);
- электромагнитные измерительные механизмы (ЭМИМ);
- электродинамические измерительные механизмы (ЭДИМ).

Электромеханический измерительный механизм (ЭИМ) прибора прямого преобразования состоит из неподвижной, соединенной с корпусом прибора, и подвижной частей. Неподвижная часть в зависимости от системы ЭИМ состоит

из постоянного магнита (в МЭИМ), ферромагнитных элементов (в ЭМИМ) или катушек (в ЭДИМ). Подвижная часть (рамка, катушка, сердечник) механически или оптически связана с показывающим устройством. Показывающее устройство ЭИМ состоит из шкалы и стрелочного или светового указателя.

Шкала СИ – часть показывающего устройства СИ, представляющая собой упорядоченный ряд отметок вместе со связанной с ними нумерацией.

Показывающее устройство СИ – совокупность элементов СИ, которые обеспечивают визуальное восприятие значений измеряемой величины или связанных с ней величин.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИ, - согласовывается с абсолютной погрешностью СИ и превышает ее в 2 – 4 раза.

Область значений шкалы прибора, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы, определяет **диапазон показаний СИ**.

Область значений величины, в пределах которой нормированы допускаемые пределы погрешности СИЮ, определяет **диапазон измерений СИ**. Класс точности средства измерений гарантируется только в диапазоне измерений.

Обозначения, наносимые на шкалы приборов, нормируются ГОСТ 23217 «Приборы электроизмерительные аналоговые с непосредственным отсчетом. Наносимые условные обозначения». Это единицы измеряемой величины; класс точности прибора; условные обозначения системы прибора и степени защищенности от магнитных и электрических полей; условное обозначение роды тока и числа фаз; условное обозначение рабочего положения прибора; условное обозначение испытательного напряжения изоляции; тип прибора и т.д. Кроме того ЭИМ могут иметь корректоры, предназначенные для установки стрелки показывающего устройства на нуль.

Принцип работы ЭИМ заключается в следующем. Если ЭИМ включить в цепь постоянного тока, то под действием вращающего момента, функционально связанного с измеряемой величиной, подвижная часть поворачивается по отношению к неподвижной.

Вращающий момент для любой конструкции ЭИМ может быть определен из общего уравнения динамики системы, согласно которому момент, действующий в системе, определяется через изменение энергии W :

$$M_{\text{в}} = \frac{\partial W}{\partial \alpha}, \quad (2.8)$$

где α - угловое перемещение подвижной части (угол поворота).

Воздействие на систему только вращающего момента привело бы к отклонению подвижной части до упора. Для обеспечения перемещения подвижной части пропорционально измеряемой величине в ЭИМ создается противодействующий момент $M_{\text{п}}$ (с помощью пружин, растяжек). Он пропорционален углу поворота:

$$M_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \alpha, \quad (2.9)$$

где k_{Π} – удельный противодействующий момент, зависящий от размеров пружины и свойств материала.

При равенстве вращающего и противодействующего моментов наступает равновесие подвижной части. Тогда $M_{\text{в}} = M_{\Pi}$, следовательно,

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = k_{\Pi} \cdot \alpha, \quad (2.10)$$

откуда угол отклонения стрелки

$$\alpha = \frac{1}{k_{\Pi}} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha}. \quad (2.11)$$

Эти выражения справедливы для механических сил (для МЭИМ).

Если противодействующий момент создается за счет электрических сил (в ЭМИМ и ЭДИМ), то движение подвижной части прекращается при равенстве двух моментов противоположного направления:

$M_1 = k_1 \cdot f_2(\alpha) \cdot x_1$ – вращающего момента;

$M_2 = k_2 \cdot f_1(\alpha) \cdot x_2$ – противодействующего момента,

где x_1, x_2 – измеряемые электрические величины;

k_1, k_2 – удельные вращающий и противодействующий моменты.

В состоянии равновесия $M_1 = M_2$, и

$$\frac{f_1(\alpha)}{f_2(\alpha)} = \frac{k_2 x_2}{k_1 x_1}. \quad (2.12)$$

Отсюда можно получить выражение для угла поворота α , который будет зависеть от отношения измеряемых величин x_1 и x_2 . Приборы, определяющие отношение двух величин, называются **логометрами**. В логометрах в обесточенном состоянии подвижная часть может находиться в любом положении, то есть стрелка прибора не устанавливается на нулевую отметку шкалы (что не является признаком неисправности прибора).

Подвижная часть прибора после каждого изменения своего положения устанавливается в равновесие после нескольких колебаний. На это требуется некоторое время, определяющее быстродействие прибора. Например, для ЭИМ время установления показаний не должно превышать 4 с. Для уменьшения времени установления показаний применяют успокоители следующих конструкций:

- воздушные, тормозящие стрелку за счет сопротивления воздуха;

- магнитоиндукционные, основанные на принципе Ленца;
- жидкостные.

Высококочувствительные измерительные механизмы создаются без успокоителей, что позволяет уменьшить массу подвижной части и, следовательно, возникающее трение.

Электроизмерительные приборы, выполненные на основе ЭИМ, по погрешностям измерений делятся на 8 классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

2.3.3 Магнитоэлектрические измерительные приборы

Принцип действия МЭИМ основан на взаимодействии токов, протекающих в одном или нескольких контурах с полями одного или нескольких постоянных магнитов. Подвижными могут быть как контуры с током, так и постоянные магниты.

Постоянный магнит и ферромагнитный цилиндр образуют магнитную систему МЭИМ. Такая конструкция обеспечивает постоянство магнитной индукции в воздушном зазоре, где вращается катушка, а магнитные силовые линии будут ориентированы по радиусу цилиндра. В оси крепятся две спиральные пружины для создания противодействующего момента и подведения тока к катушке. Одна соединяется с корпусом, другая – с корректором нуля. У оси еще крепится стрелка с грузиками. Грузики предназначены для уравнивания подвижной части.

Энергия магнитоэлектрической системы, сосредоточенная в механизме и вызывающая вращающий момент, равна

$$W_{\Sigma} = W_M + W_K + W_{ВЗ}, \quad (2.13)$$

где W_M – энергия поля магнита;

$$W_K = \frac{LI^2}{2} - \text{энергия катушки с током};$$

$W_{ВЗ} = \Psi \cdot I$ – энергия взаимодействия поля магнита и катушки с током;
 Ψ – потокосцепление.

Вращающий момент для системы с равномерным радиальным магнитным полем равен

$$M_B = B \cdot S \cdot w \cdot I, \quad (2.14)$$

где B – магнитная индукция в зазоре постоянного магнита;

S – площадь поперечного сечения катушки;

w – число витков катушки.

Так как противодействующий момент создается спиральными пружинами, то он будет равен

$$M_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot \alpha, \quad (2.15)$$

где k_{Π} – коэффициент жесткости пружины.

Приравняв вращающий и противодействующий моменты, получим **уравнение шкалы** (уравнение измерения) МЭИМ, устанавливающее зависимость угла поворота подвижной части измерительного механизма от измеряемой величины:

$$\alpha = \frac{BSw}{k_{\Pi}} \cdot I = S_I \cdot I, \quad (2.16)$$

где $S_I = \frac{BSw}{k_{\Pi}}$ - чувствительность измерительного механизма к току.

Из полученных выражений можно сделать следующие выводы:

- угол отклонения подвижной части (стрелки) МЭИМ прямо пропорционален току;
- чувствительность МЭИМ постоянна, следовательно, шкала равномерная;
- МЭИМ реагирует только на постоянный ток, а при включении в цепь переменного тока вследствие инерционности подвижной части стрелка будет совершать колебательные движения только на низких частотах.

Из внешних факторов на МЭИМ наибольшее влияние оказывает температура, при изменении которой изменяются магнитная индукция и сопротивление катушки.

Аналогичным образом устроены магнитоэлектрические логометры, только они имеют две катушки на общей оси, установленные перпендикулярно друг к другу, а полюсные наконечники расточены в форме цилиндра, что приводит к зависимости магнитной индукции в зазоре от угла поворота. Исходя из этого уравнение шкалы магнитоэлектрического логометра примет вид

$$\frac{B_1(\alpha)}{B_2(\alpha)} = \frac{w_2 \cdot S_2 \cdot I_2}{w_1 \cdot S_1 \cdot I_1}. \quad (2.17)$$

Решив уравнение относительно угла поворота, получим выражение для угла поворота в зависимости от отношения токов, протекающих в катушках:

$$\alpha = F\left(\frac{I_2}{I_1}\right). \quad (2.18)$$

2.3.4 Измерение тока на радиочастотах

Для измерения силы тока на радиочастотах применяются электромеханические приборы в сочетании с преобразователями рода тока. Наиболее подходящими являются МЭИМ, отличающиеся высокой чувствительностью, точностью и малым потреблением мощности. Все высокочастотные аналоговые амперметры являются приборами прямого преобразования и представляют собой комбинацию преобразователя переменного тока в постоянный и МЭИМ.

В зависимости от типа преобразователя имеются следующие разновидности амперметров:

- выпрямительные;
- термоэлектрические;
- фотоэлектрические;
- электронные.

Электронные амперметры как самостоятельные не выпускаются. Они входят в состав универсальных электронных вольтметров (В7) и будут рассмотрены в соответствующем разделе.

2.3.5 Выпрямительные амперметры

В качестве преобразователя на низких частотах часто используют полупроводниковые диоды.

В зависимости от схемы соединения МЭИМ с выпрямителем различают амперметры с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением.

Схема однополупериодного выпрямителя представлена на рисунке 2.3.

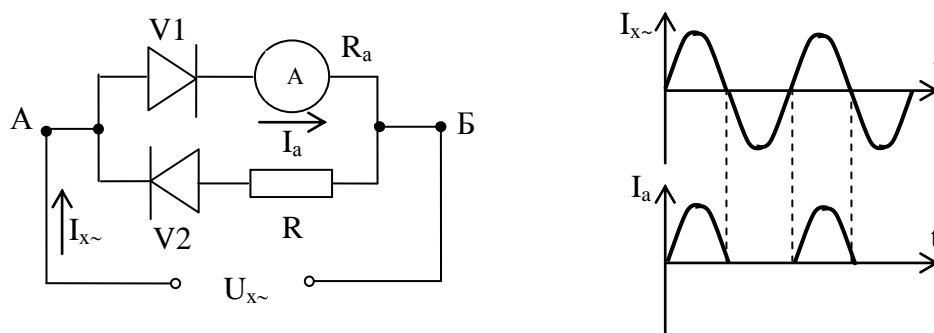


Рисунок 2.3 – Схема однополупериодного выпрямителя

В течение одного полупериода ток протекает через прибор, а в течение второго – по цепи $R - V2$. Обе цепи идентичны (диоды V1 и V1 одинаковые, $R = R_a$), следовательно, подключение амперметра не изменяет характера тока в нагрузке.

Мгновенный вращающий момент

$$M_{в i} = B_0 \cdot w \cdot S \cdot i, \quad (2.19)$$

где $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ – мгновенное значение тока.

Вследствие инерционности подвижной части ее отклонение будет пропорционально среднему значению вращающего момента, следовательно, уравнение шкалы будет иметь вид

$$\alpha = \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_{\Pi}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin \omega t \, dt = \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_{\Pi}} \cdot \frac{I_{св}}{2} = S_{Iв} \cdot \frac{I_{св}}{2}, \quad (2.20)$$

где $S_{Iв} = \frac{B_0 \cdot S \cdot w}{k_{\Pi}}$ – чувствительность амперметра.

Из полученного выражения видно, что выпрямительные амперметры измеряют **средневыпрямленное** значение тока.

Схема с двухполупериодным выпрямлением представляет собой диодный мост, в одну из диагоналей которого включен МЭИМ, а ток через него протекает в течение обоих полупериодов, поэтому уравнение шкалы будет иметь вид

$$\alpha = S_{Iв} \cdot \frac{I_{св}}{2} \cdot 2 = S_{Iв} \cdot I_{св}, \quad (2.21)$$

а следовательно, при одном и том же значении тока в цепи угол отклонения подвижной части прибора будет в два раза больше, чем у однополупериодного, что приводит к увеличению чувствительности МЭИМ вдвое.

Источниками погрешностей выпрямительных амперметров являются

- 1) зависимость коэффициента выпрямления диода от температуры;
- 2) изменение формы измеряемого тока;
- 3) погрешности градуировки амперметра;
- 4) изменение емкостного сопротивления диодов в зависимости от частоты.

Погрешность выпрямительных амперметров составляет (1,5 – 4)%, используются они в диапазоне частот до 2 кГц, а с частотной коррекцией – до нескольких десятков кГц. С повышением частоты измеряемого тока погрешность возрастает.

2.3.6 Термоэлектрические амперметры

Термоэлектрические преобразователи амперметров состоят из термопар, которые могут быть контактными и бесконтактными. В состав термопреобразователя входит подогреватель, по которому протекает измеряемый ток. В бесконтактных преобразователях отсутствует гальваническая связь между подогревателем и термопарой, поэтому

измеряемый ток не ответвляется в цепь индикаторного прибора. Недостатком таких преобразователей является большая инерционность.

Разность температур спая и свободных концов термопары вызывает термо-э.д.с., которая связана с током I_x , протекающим по подогревателю:

$$E_T = k_T \cdot I_x^2, \quad (2.22)$$

где k_T – температурный коэффициент сопротивления, зависящий от материала термопары. Измеряемый ток I_x характеризует тепловое действие тока, и, следовательно, является **среднеквадратическим**. Уравнение шкалы имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{S_I \cdot k_T}{R_a + R_T} \cdot I_x^2 = S_{I_x} \cdot I_x^2, \quad (2.23)$$

где S_{I_x} – чувствительность термоэлектрического амперметра.

Из полученного уравнения следует, что шкала термоэлектрического амперметра квадратичная, а показания не зависят от вида измеряемого тока. Диапазон измеряемых токов – от миллиампер до десятков ампер.

Источниками погрешностей являются

- изменение температуры окружающей среды;
- частотная зависимость сопротивления подогревателя.

Для уменьшения температурной зависимости показаний термоамперметра последовательно с индикатором включается температурнезависимый резистор из манганиновой проволоки.

2.3.7 Фотоэлектрические амперметры

В фотоэлектрических амперметрах под действием измеряемого тока нагревается нить измерительной лампы, а световой поток, излучаемый лампой, попадает на фотоэлектрический преобразователь, где преобразуется в электрический ток, усиливается и регистрируется магнитоэлектрическим амперметром, проградуированным в значениях среднеквадратического тока.

Достоинством таких амперметров является высокая точность благодаря возможности градуировки на постоянном токе или токе низкой частоты, вследствие чего они широко применяются для измерения высокочастотных токов.

Фотоэлектрические амперметры входят в состав поверочных установок и государственного специального эталона единицы силы переменного тока.

2.3.8 Расширение пределов измерения силы тока

Для расширения пределов измерения постоянного тока применяют **шунты** – резисторы, включаемые параллельно амперметру (рисунок 2.4).

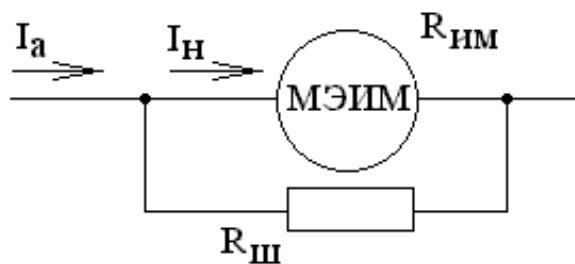


Рисунок 2.4 – Схема включения амперметра с шунтом

Выбор сопротивления шунта для данного прибора зависит от коэффициента расширения пределов измерения $n = I / I_a$, где I_a – максимальный ток отклонения подвижной части измерительного механизма без шунта, I – предел измерения с подключенным шунтом. Отсюда сопротивление шунта будет равно

$$R_{ш} = \frac{R_a}{n - 1}, \quad (2.24)$$

где R_a – внутреннее сопротивление измерительного механизма.

Погрешность амперметра с шунтом возрастает из-за неточности изготовления шунтов и различных ТКС катушки амперметра и шунта. Классы точности амперметров с шунтами – 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5.

При использовании шунтов на переменном токе возникают дополнительные частотные погрешности, и в этом случае для расширения пределов измерения тока применяют **измерительные трансформаторы тока** (особенно для больших токов). Первичная обмотка трансформатора содержит малое количество витков и включается последовательно с нагрузкой. Вторичная обмотка содержит большое число витков и подключается к амперметру.

Номинальный коэффициент трансформации

$$k_{Iн} = \frac{I_{1н}}{I_{2н}} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (2.25)$$

где $I_{1н}$ и $I_{2н}$ – номинальные токи в первичной и вторичной обмотках; w_1 и w_2 – число витков соответствующих обмоток. Отсюда можно найти измеряемый ток. С помощью применения трансформаторов тока можно измерять токи в первичной цепи от 0,1 А до 60 кА.

Следует отметить, что при использовании трансформаторов тока необходимо заземление!

Источниками погрешностей в данном случае будут потери при преобразовании тока.

Классы точности амперметров с измерительными трансформаторами – 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10.

2.3.9 Методическая погрешность при измерении силы тока

При включении амперметра в цепь изменяется режим работы цепи, так как амперметр потребляет некоторую мощность, что приводит к появлению методической погрешности. Схема включения амперметра в измерительную цепь изображена на рисунке 2.5.

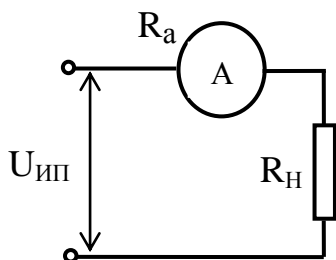


Рисунок 2.5 – Схема включения амперметра в измерительную цепь

До включения амперметра в измерительную цепь ток в цепи (действительное значение тока) равен

$$I_x = \frac{U}{R_n}, \quad (2.26)$$

где U – падение напряжения на нагрузке, R_n – сопротивление нагрузки.

После включения амперметра в цепь ток в цепи (измеренное значение) будет равен

$$I_x = \frac{U}{R_n + R_a}, \quad (2.27)$$

где R_a – внутреннее сопротивление амперметра.

Относительная погрешность измерения в этом случае будет равна

$$\delta = \frac{I - I_x}{I_x} = - \frac{1}{1 + \frac{R_n}{R_a}}. \quad (2.28)$$

Минус показывает, что измеренное значение тока меньше действительного.

Из полученного уравнения видно, что для минимизации методической погрешности при измерении силы тока необходимо, чтобы $R_a \ll R_n$,

следовательно, при конструировании амперметров необходимо стремиться к снижению внутреннего сопротивления амперметра.

Эта погрешность является систематической и может быть исключена из результатов измерения введением поправки.

2.3.10 Измерение напряжения электронными аналоговыми вольтметрами.

2.3.10.1 Аналоговые вольтметры прямого преобразования

К аналоговым вольтметрам относятся электромеханические и электронные вольтметры, в которых измеряемое напряжение преобразуется в пропорциональное значение постоянного тока, измеряемое магнитоэлектрическим прибором.

Структурная схема аналогового вольтметра представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Обобщенная структурная схема аналогового вольтметра

В качестве входного устройства обычно используется делитель напряжения либо аттенюатор, расширяющие пределы измерения.

Измерительный преобразователь – это усилитель постоянного тока в вольтметрах постоянного напряжения (В2) либо выпрямитель в сочетании с усилителем постоянного либо переменного тока (В3, В4).

Для вольтметра постоянного напряжения структурная схема имеет вид, представленный на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Структурная схема вольтметра постоянного напряжения.

Уравнение шкалы такого вольтметра имеет вид

$$\alpha = S_B \cdot \frac{U_x}{k_y}, \quad (2.29)$$

где U_x – измеряемое напряжение;

k_y – коэффициент усиления усилителя;

S_B – чувствительность вольтметра, включающая в себя чувствительность МЭИМ и чувствительность усилителя постоянного тока.

Недостатком этой схемы является ограничение нижнего предела измерения напряжения несколькими сотнями милливольт. Устранения этого недостатка добиваются применением операции «модуляция» - «усиление» - «демодуляция».

2.3.10.2 Вольтметры переменного напряжения

Вольтметры переменного напряжения строятся по двум схемам: с детектором на входе и с детектором на выходе.

На рисунке 2.9 представлена схема вольтметра переменного напряжения с детектором на входе.

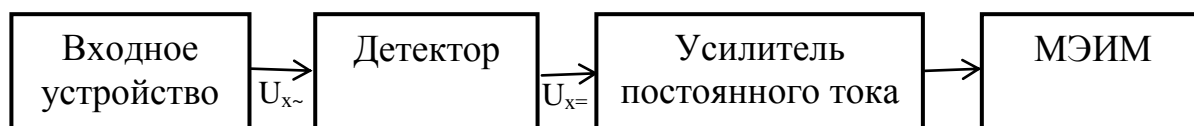


Рисунок 2.9 – Структурная схема вольтметра переменного напряжения с детектором на входе.

Схема с детектором на входе не имеет ограничения по диапазону частот измеряемых напряжений (от 20 Гц до 500 МГц, даже до 1000 – 3000 МГц), но обладает низкой чувствительностью (несколько делений на мВ).

На рисунке 2.10 представлена схема вольтметра переменного напряжения с детектором на выходе.



Рисунок 2.10 – Структурная схема вольтметра переменного напряжения с детектором на выходе.

В вольтметрах с детектором на выходе уже полоса частот измеряемого напряжения, которая ограничивается полосой пропускания усилителя переменного тока (не более 50 МГц), но выше чувствительность.

У обеих модификаций вольтметров может быть широкий диапазон измеряемых напряжений (за счет изменения коэффициента деления входного устройства и коэффициента усиления усилителя).

В аналоговых вольтметрах переменного напряжения в качестве детекторов используются термоэлектрические и выпрямительные преобразователи. Тип детектора определяет вид измеряемого напряжения. Следовательно, показания вольтметра могут быть пропорциональны среднеквадратическому, пиковому и средневыпрямленному значениям переменного напряжения, что соответствует классификации вольтметров: вольтметры средневыпрямленного, среднеквадратического и амплитудного значения (импульсные).

В вольтметрах среднеквадратического значения используются бесконтактные вакуумные термопреобразователи (рисунок 2.11).

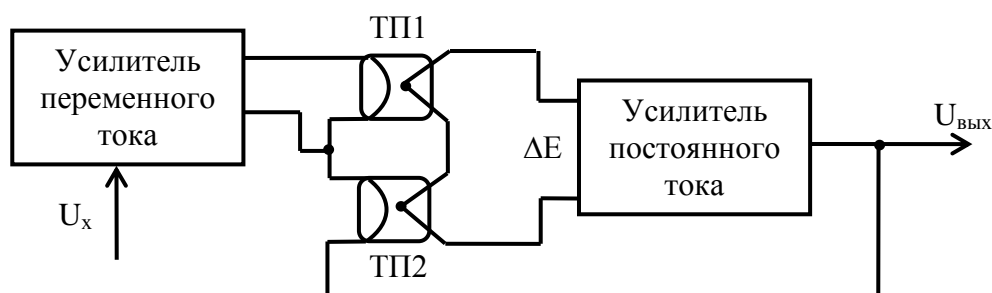


Рисунок 2.11 – Детектор среднеквадратического значения

Вольтметры такого типа обычно выполняются с усилителем на входе, а усилитель постоянного тока имеет большой коэффициент усиления.

Основная погрешность преобразования зависит от неидентичности параметров термопреобразователей и увеличивается с их старением до 2,5–6 %.

Рассматриваемые вольтметры обеспечивают измерение сигналов, имеющих большое количество гармонических составляющих. Недостатком их является сравнительно большое время измерения (1 – 3 с), определяемое инерционностью термопреобразователей.

Вольтметры амплитудного значения могут выполняться по схеме с открытым или закрытым входом (рисунок 2.12).

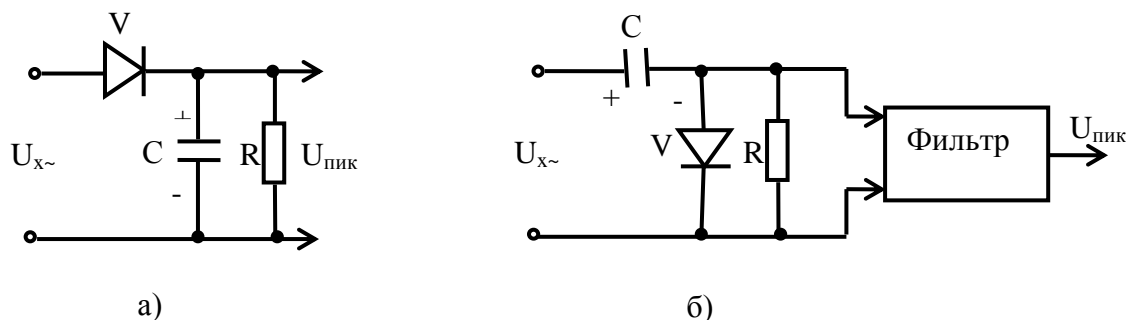


Рисунок 2.12 – Детектор пикового значения (а – с открытым входом; б – с закрытым входом).

Преобразователь с открытым входом (рисунок 2.12а) работает при определенной полярности постоянной составляющей («+» должен быть приложен к аноду диода). Для измерения напряжения с отрицательной постоянной составляющей диод включают наоборот.

Измеряемое напряжение $U_{x\sim}$ будет равно сумме постоянной U_0 и переменной составляющих сигнала:

$$U_{x\sim} = U_0 + U_m \cdot \sin \omega t. \quad (2.30)$$

Когда к преобразователю приложено переменное напряжение, через диод протекает ток, и конденсатор зарядится до некоторого напряжения U_c . Значение сопротивления резистора R должно быть большим для обеспечения большой постоянной времени τ_c . Относительная погрешность преобразования будет равна

$$\delta = \frac{U_m - U_c}{U_m} = \frac{T}{2RC}, \quad (2.31)$$

где T – период исследуемого колебания.

Детектор с закрытым входом (рисунок 2.12б) работает следующим образом. Если на вход преобразователя подано гармоническое напряжение, то конденсатор зарядится за счет постоянной составляющей до уровня U_0 , и преобразователь будет реагировать только на переменную составляющую. Во время действия положительной полуволны выходное напряжение $U_{\text{пик}} \approx U_{m+}$, а при отрицательной - $U_{\text{пик}} \approx U_{m-}$. Напряжение на резисторе R является пульсирующим, и на низких частотах стрелка индикатора будет колебаться. Для уменьшения пульсаций на выходе такого преобразователя ставится RC-фильтр.

Вольтметры с закрытым входом используются для измерения пульсаций напряжения источников питания, определения симметричности амплитудной модуляции, наличия ограничения сигналов и т.д.

Шкалы вольтметров с амплитудными преобразователями градуируются в среднеквадратических значениях при синусоидальной форме напряжения на входе. При измерениях напряжения любой формы $U_{\text{пик}} = U_v \cdot \sqrt{2} \cdot k_a$.

Вольтметры средневыпрямленного значения выполняются по выпрямительной схеме с двухполупериодным выпрямлением. Шкала вольтметра градуируется в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения. При измерениях напряжения несинусоидальной формы

пользуются соотношением $U_x = \frac{U_v \cdot k_{\phi x}}{1,11}$.

2.3.10.3 Аналоговые вольтметры сравнения

В большинстве случаев в аналоговых вольтметрах сравнения используют нулевой метод (в так называемых компенсационных вольтметрах). По сравнению с вольтметрами прямого преобразования это более сложные, но и более точные приборы. Кроме того, в момент компенсации они не потребляют мощности от источника питания, следовательно, с их помощью можно измерять э.д.с. маломощных источников питания. В приборах сравнения используется мера.

Принцип действия **потенциометра постоянного тока** основан на взаимном уравнивании (компенсации) э.д.с. испытуемого источника и известного падения напряжения на сопротивлении. В качестве меры используется нормальный элемент – электрохимический элемент, э.д.с. которого известна с очень высокой степенью точности (классы точности от 0,0002 до 0,02). Малая погрешность потенциометра определяется высокой стабильностью э.д.с. нормального элемента и чувствительностью нуль-индикатора. Особенностью измерений является тщательное соблюдение полярности соединения; в противном случае добиться компенсации невозможно.

Потенциометры переменного тока по принципу действия аналогичны рассмотренному, однако погрешность их больше (в лучшем случае 0,05%), так как отсутствуют меры э.д.с. переменного тока, аналогичные нормальному элементу.

2.3.11 Расширение пределов измерения напряжения

Для расширения пределов измерения постоянного напряжения используются добавочные сопротивления, подключаемые последовательно с вольтметром (рисунок 2.13).

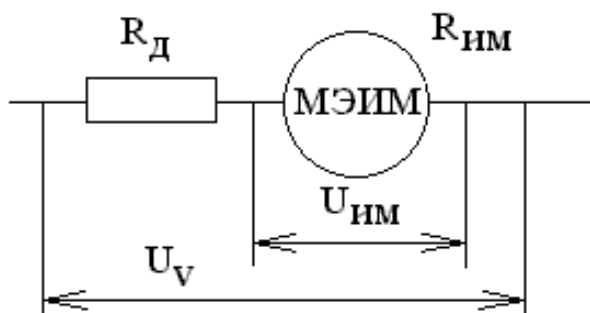


Рисунок 2.13 – Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением

Если необходимо расширить пределы измерения от U_v до U , то величину добавочного сопротивления можно вычислить из выражения

$$R_d = R_v \left(\frac{U}{U_v} - 1 \right), \quad (2.32)$$

где R_v – входное сопротивление вольтметра.

Однако при использовании добавочного сопротивления возрастает погрешность измерения из-за неточности изготовления резисторов и появления частотной погрешности.

Для расширения пределов измерения на постоянном токе используют измерительные трансформаторы напряжения. При этом количество витков в первичной обмотке должно быть больше количества витков во вторичной обмотке. Расширенный предел измерения будет равен $U = K_{UH} \cdot U_v$.

2.3.12 Методическая погрешность при измерении напряжения

Схема включения вольтметра в измерительную цепь представлена на рисунке 2.14.

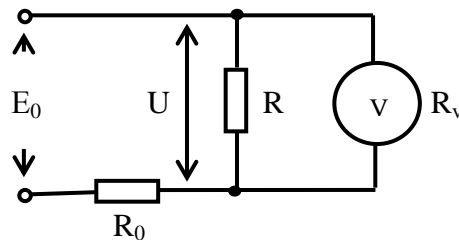


Рисунок 2.14 – Схема включения вольтметра в измерительную цепь (R_0 – внутреннее сопротивление источника питания; E_0 – его э.д.с.; R_v – входное сопротивление вольтметра; R_n – сопротивление нагрузки).

При измерении вольтметр потребляет некоторую мощность; следовательно, при измерении напряжения будет присутствовать методическая погрешность.

До включения вольтметра в цепь напряжение на нагрузке U (действительное значение напряжения) равно

$$U = \frac{E_0 \cdot R_n}{R_0 + R_n}. \quad (2.33)$$

Измеренное значение напряжения (после подключения вольтметра) равно

$$U_x = \frac{E_0}{R_0 + \frac{R_n \cdot R_v}{R_n + R_v}} \cdot \frac{R_n \cdot R_v}{R_n + R_v}. \quad (2.34)$$

Тогда методическая погрешность измерения напряжения будет равна

$$\delta_U = \frac{U_x - U}{U} = - \frac{1}{1 + \frac{R_v}{R_n} + \frac{R_v}{R_0}}. \quad (2.35)$$

Из данного выражения можно сделать вывод, что для уменьшения методической погрешности необходимо выбирать вольтметр с возможно большим входным сопротивлением. Эту погрешность можно исключить и скорректировать результат измерения.

2.3.13 Зависимость показаний вольтметров от формы кривой измеряемого напряжения

Важной характеристикой вольтметра является его градуировочная характеристика, устанавливающая соотношение между показанием прибора U_n и значением определяемого параметра U_x : $U_x = c \cdot U_n$, где c – градуировочный коэффициент, зависящий от типа детектора и вида измеряемого параметра.

Шкалы подавляющего большинства вольтметров градуируют в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, так как при измерении гармонического напряжения преимущественно интересуются его среднеквадратическим значением.

Если детектор квадратичный, то $c = 1$ и показание прибора непосредственно дает значение $U_{ск}$, т.е. $U_n = U_{ск}$. При детекторах других типов $c \neq 1$.

Чтобы правильно определить искомый параметр напряжения по показаниям прибора, необходимо знать тип детектора и градуировочную характеристику.

Когда измеряется напряжение несинусоидальной формы вольтметрами, предназначенными для измерения гармонических напряжений, шкалы которых проградуированы в среднеквадратических значениях синусоидального напряжения, то в случае открытых входов вольтметров поступают следующим образом:

- показание вольтметра с пиковым детектором умножают на 1,41:

$$U_m = 1,41 \cdot U_n;$$

- при квадратичном детекторе $U_{ск} = U_n$;

- для детектора средневыпрямленного значения $U_{св} = 0,9 \cdot U_n$.

2.3.14 Измерение постоянного напряжения цифровыми вольтметрами

Цифровой вольтметр – прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации; его показания представлены в цифровой форме.

Обобщенная структурная схема цифрового вольтметра представлена на рисунке 2.15.

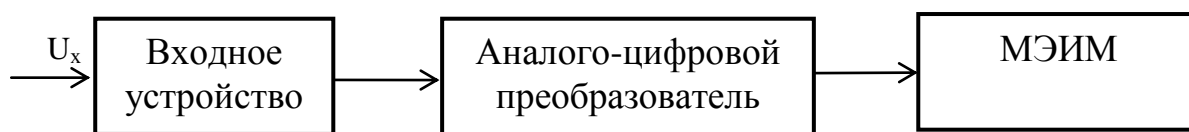


Рисунок 2.15 – Обобщенная структурная схема цифрового вольтметра

Входное устройство изменяет масштаб измеряемого напряжения, при необходимости отфильтровывает помехи и изменяет полярность напряжения.

Основным классификационным признаком является вид аналого-цифрового преобразователя (АЦП), применяемого в вольтметре.

В зависимости от структурной схемы АЦП различают

- вольтметры с прямым преобразованием без обратной связи;
- вольтметры с уравнивающим (компенсационным) преобразованием с общей отрицательной обратной связью.

2.3.14.1 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с время-импульсным преобразованием

Принцип работы вольтметров с время-импульсным преобразованием заключается в преобразовании измеряемого напряжения U_x в пропорциональный интервал времени Δt , длительность которого определяется путем заполнения импульсами опорной частоты и подсчета числа этих импульсов N с помощью счетчика.

Структурная схема представлена на рисунке 2.16.

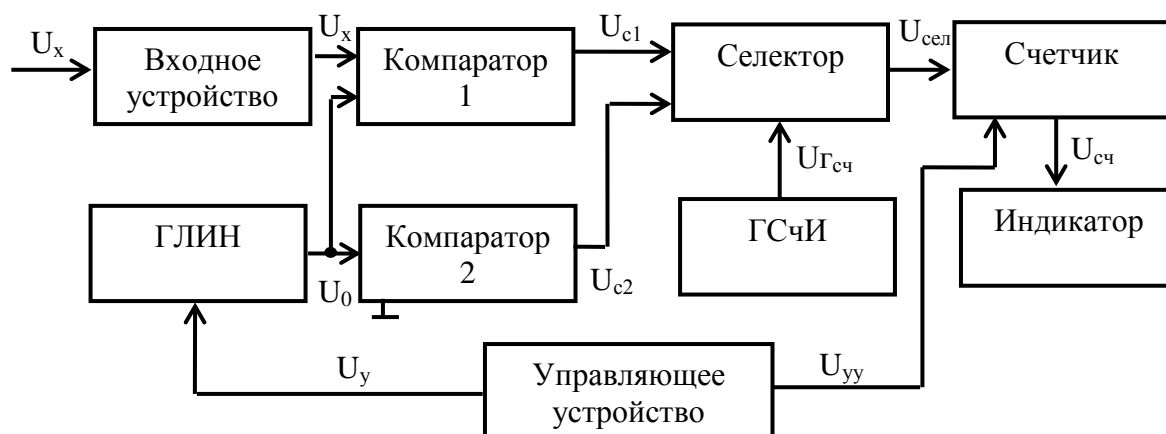


Рисунок 2.16 – Структурная схема цифрового вольтметра с время-импульсным преобразованием.

На рисунке 2.17 представлены эпюры напряжения, иллюстрирующие работу вольтметра.

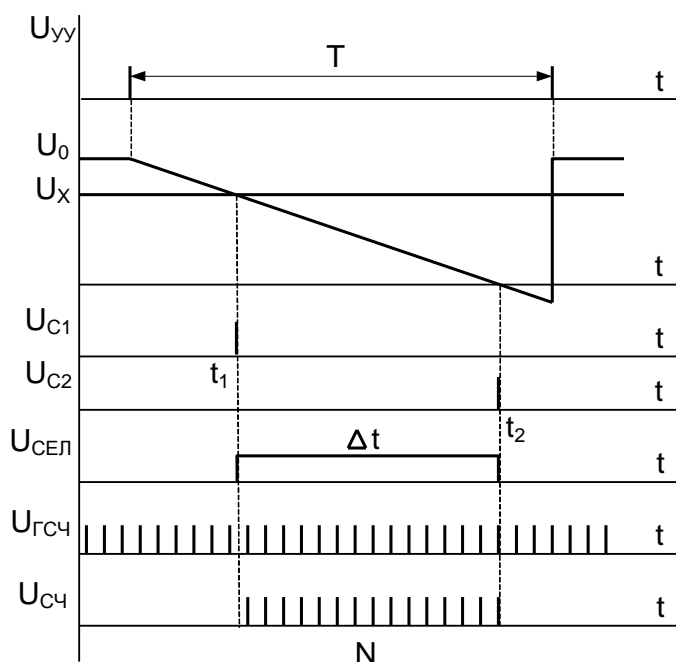


Рисунок 2.17 – Эпюры напряжения, иллюстрирующие работу вольтметра с время-импульсным преобразованием.

Измеряемое напряжение через входное устройство подается на компаратор 1. Управляющее устройство задает циклы измерения в автоматическом режиме (длительностью $T_{сч}$). В начале цикла измерения импульс управляющего устройства сбрасывает предыдущие значения, отсчитанные счетчиком, и запускает генератор линейно изменяющегося напряжения ГЛИН. Напряжение U_x и образцовое напряжение U_0 поступают на входы компаратора 1, и в момент времени их равенства t_1 на выходе компаратора 1 возникает импульс $U_{с1}$, открывающий селектор. В момент времени t_2 , когда $U_0 = 0$, компаратор 2 вырабатывает импульс $U_{с2}$, закрывающий селектор. Счетчик считает количество импульсов N с генератора счетных импульсов ГСчИ, прошедших через селектор. Измеряемое напряжение будет равно

$$U_x = k \cdot \Delta t, \quad (2.36)$$

где $k = \frac{dU_0}{dt} = \operatorname{tg} \alpha$ - скорость изменения напряжения ГЛИН.

В свою очередь, $\Delta t = N \cdot T_{сч}$, откуда следует $U_x = k \cdot N \cdot T_{сч} = k_v \cdot N$; $k_v = k \cdot T_{сч} = \operatorname{const}$.

K_v выбирается из условия $k_v = 10^{-m}$, где $m = 0, 1, 2, \dots$. Показатель m изменяется при переключении пределов измерения.

Источниками погрешностей являются

- погрешность, обусловленная нелинейностью образцового напряжения U_0 и нестабильностью скорости его нарастания δ_{U0} ;
- погрешность из-за нестабильности частоты ГСЧИ $\delta_{ГСЧИ}$;
- погрешность дискретности, равная единице младшего разряда $\pm 1/N$;
- погрешность из-за входной гармонической помехи.

Рассмотренный вольтметр является неинтегрирующим. В интегрирующих вольтметрах время-импульсного преобразования подсчет импульсов ведется за время $(T_1 + T_2)$. Такие вольтметры более помехоустойчивы.

2.3.14.2 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с частотно-импульсным преобразованием

Принцип работы цифровых вольтметров с частотно-импульсным преобразованием основан на преобразовании измеряемого напряжения в пропорциональную ему частоту следования импульсов, а затем в цифровой код. Структурная схема вольтметра с частотно-импульсным преобразованием представлена на рисунке 2.18.

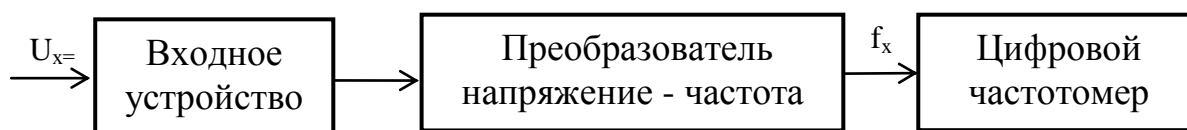


Рисунок 2.18 – Структурная схема вольтметра с частотно-импульсным преобразованием.

Частота на выходе преобразователя «напряжение-частота» равна

$$f_x = k \cdot U_{x=}, \quad (2.37)$$

где k – коэффициент преобразования.

В зависимости от метода преобразования «напряжение – частота» все схемы преобразователей подразделяются на 2 группы:

- преобразователи с непосредственным преобразованием;
- преобразователи с косвенным преобразованием.

Структурная схема и эпюры напряжения преобразователя с непосредственным преобразованием представлены на рисунке 2.19.

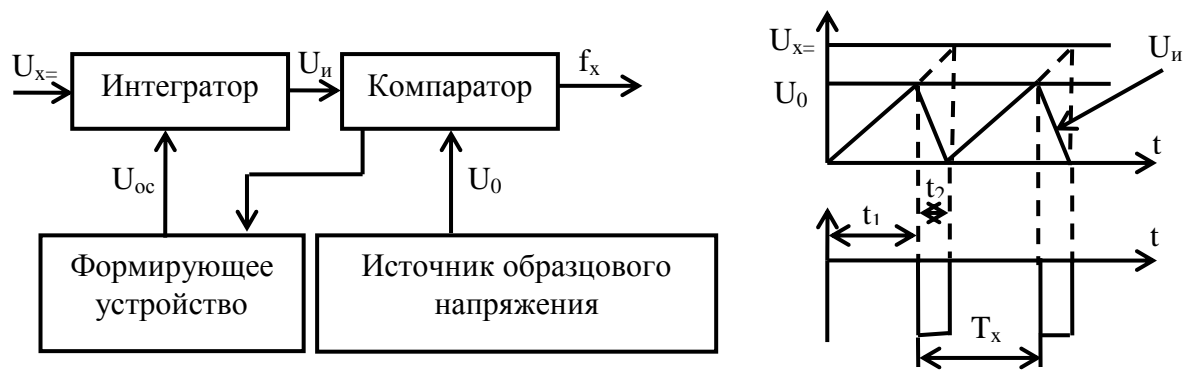


Рисунок 2.19 – Структурная схема преобразователя с непосредственным преобразованием.

В интеграторе напряжение U_x интегрируется с постоянной времени τ_1 :

$$U_{и} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{t_1} U_x dt . \quad (2.38)$$

Напряжение возрастает и сравнивается в компараторе с образцовым напряжением U_0 в течение времени t_1 . Сигнал после компаратора воздействует на формирователь импульсов обратной связи, и на входе интегратора действуют одновременно два сигнала: U_x и $U_{ос}$ отрицательной полярности. Частота импульсов обратной связи пропорциональна измеряемому напряжению:

$$f_x = k \cdot U_{x-} . \quad (2.39)$$

При изменении U_x изменяется крутизна $U_{и}$ на выходе интегратора, а следовательно, изменяется и частота f_x .

В преобразователе с **косвенным преобразованием** измеряемое напряжение влияет на параметр, определяющий частоту генератора с самовозбуждением (гармонического или релаксационного), однако такие вольтметры имеют невысокие метрологические характеристики.

Источники погрешности вольтметров с частотно-импульсным преобразованием:

- погрешности, свойственные цифровому частотомеру (относительная нестабильность частоты генератора и погрешность дискретности);
- погрешности, вносимые преобразователем «напряжение-частота» из-за неточности установки и нестабильности значений U_0, τ .

2.3.14.3 Вольтметры с прямым преобразованием. Цифровые вольтметры с кодо-импульсным преобразованием

Принцип работы заключается в преобразовании измеряемого напряжения в цифровой код путем последовательного сравнения с рядом дискретных значений известной величины, изменяющейся по определенному закону.

Операция преобразования может осуществляться по алгоритму **развертывающего и следящего уравнивания**.

Структурная схема вольтметра с **развертывающим уравниванием** представлена на рисунке 2.20.

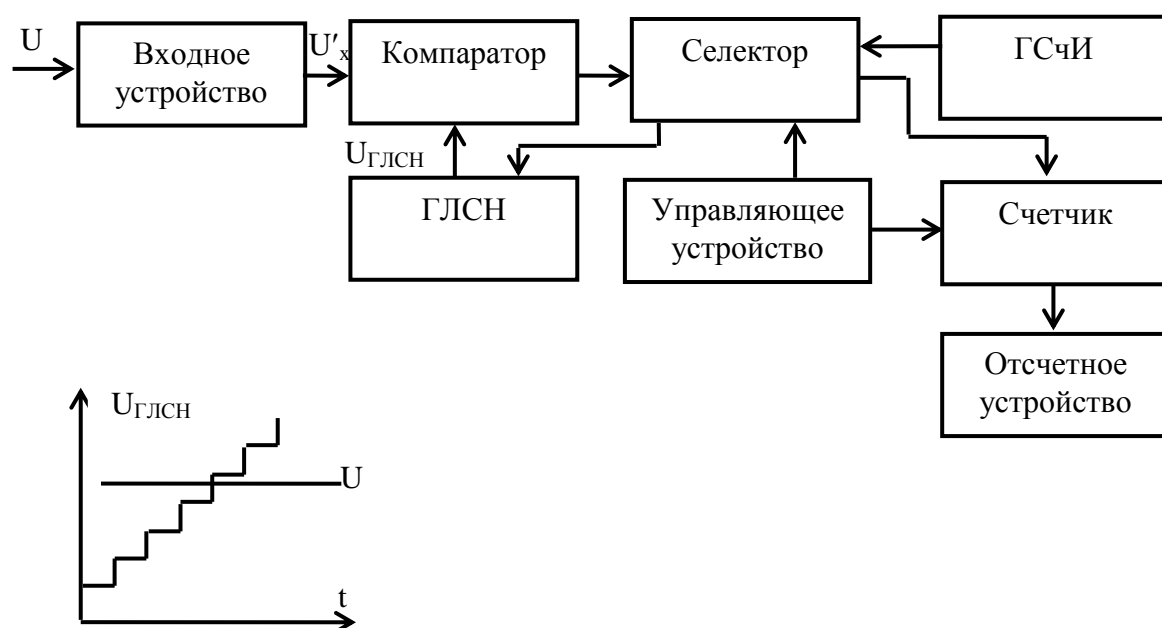


Рисунок 2.20 – Структурная схема цифрового вольтметра с развертывающим уравниванием

С блока генератора линейно-ступенчатого напряжения (ГЛСН) сигнал в виде набора образцовых напряжений в течение цикла измерения поступает на сравнивающее устройство (компаратор). Длительность ступеньки определяется периодом следования импульсов с генератора счетных импульсов (ГСЧИ), а величина ступеньки определяет шаг квантования (младший разряд счета). Управляющее устройство вырабатывает тактовые импульсы. С поступлением их с ГЛСН последовательно снимаются образцовые напряжения в двоично-десятичном коде. На второй вход компаратора со входного устройства поступает измеряемое напряжение U'_x . При равенстве $U'_x = U_{ГЛСН}$ компаратор срабатывает и стоп-импульсом закрывает селектор. Поскольку $\Delta U_{ГЛСН} = \text{const}$, показание счетчика прямо пропорционально измеряемому напряжению U_x , и мы получаем прямоотсчетный цифровой вольтметр.

Вольтметры с развертывающим уравниванием имеют малое быстродействие и невысокие метрологические характеристики.

Структурная схема вольтметра со следящим (поразрядным) уравниванием представлена на рисунке 2.21 .

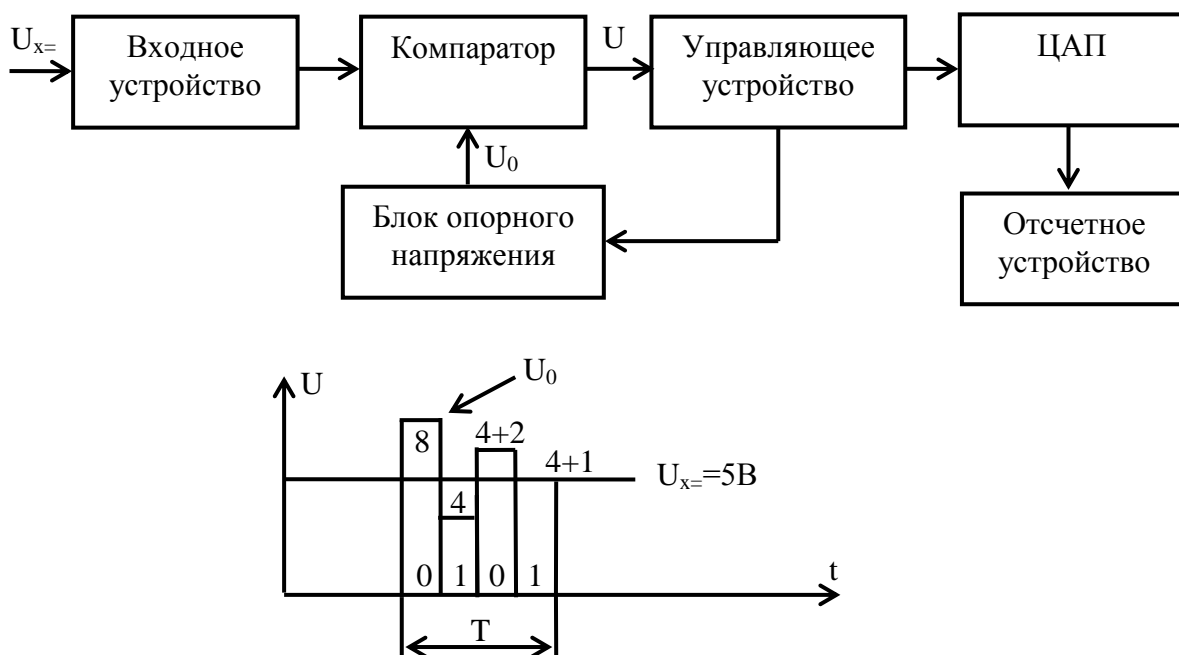


Рисунок 2.21 – Структурная схема цифрового вольтметра с поразрядным уравниванием

Блок опорного напряжения состоит из источника и нагрузок, скомпонованных по двоично-десятичным разрядам, в которых имеются 4 резистора с «весами» 8, 4, 2, 1. Управляющее устройство вырабатывает тактовые импульсы. С помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) реализуется отрицательная обратная связь путем преобразования кода (например, 8421) в аналоговое напряжение U_k , которое затем сравнивается с измеряемым напряжением $U_{x=}$ в компараторе. Это сравнение всегда начинается со старшего разряда (например, 8 В). Если при этом $U_k \leq U_{x=}$, то компаратор не оказывает воздействия на управляющее устройство, и оно тактовым импульсом подключает к ЦАП очередной разряд U_k (1). Если $U_k > U_{x=}$, то разряд пропускается (0). Процесс сравнения заканчивается после полного перебора всех разрядов U_k . Одновременно с переключением разрядов управляющее устройство формирует код для отсчетного устройства, где после перехода к десятичной системе счисления воспроизводится результат измерения. В данной схеме есть опасность возникновения автоколебаний в системе, хотя она лучше схемы со следящим уравниванием.

Источниками погрешностей являются неточная установка и нестабильность параметров компаратора, ЦАП, ГЛСН и ГСЧИ.

Погрешность измерения цифровыми вольтметрами с кодо-импульсным преобразованием составляет $\pm(0,05 \dots 0,1)\%$.

2.3.15 Цифровые вольтметры переменного напряжения

Входной величиной АЦП в данном случае является напряжение переменного тока произвольной формы, изменяющееся в широком диапазоне частот, а выходной величиной – цифровой код.

В то же время для преобразования измеряемого напряжения в цифровой код оно должно иметь форму, удобную для кодирования. Следовательно, необходимы предварительные функциональные преобразования переменного напряжения в постоянное, обработка мгновенных значений переменного напряжения и трансформация спектра переменного напряжения в область более низких частот.

Преобразователи переменного напряжения в постоянное просты, удобны, работают в широком диапазоне частот. После преобразования можно использовать цифровые вольтметры переменного напряжения.

Преобразователи с обработкой мгновенных значений применяют на низких частотах.

Преобразователи с трансформацией спектра применяют на высоких частотах.

Преобразователи переменного напряжения в постоянное аналогичны детекторам аналоговых вольтметров. Следовательно, измеряемое переменное напряжение может быть пропорционально амплитудному, среднеквадратическому или средневыпрямленному напряжению. Однако требования к таким преобразователям выше в части точности и линейности преобразования, чувствительности, динамического и частотного диапазонов.

По-иному могут проектироваться преобразователи амплитуды импульсов в импульсных цифровых вольтметрах. Амплитуда импульсов может преобразовываться в пропорциональный интервал времени, который заполняется импульсами ГСЧИ. Это преобразование осуществляется с помощью схемы, аналогичной пиковому детектору. Конденсатор заряжается до U_{\max} за время действия импульса, а по окончании импульса разряжается через токостабилизирующий элемент по линейному закону.

Рассмотренные принципы построения цифровых вольтметров переменного напряжения приняты за основу при проектировании **универсальных вольтметров**. Измеряемая величины преобразуется в постоянное напряжение с последующим его измерением цифровым вольтметром постоянного тока. Аналоговая часть представляет собой набора преобразователей измеряемых величин в постоянное напряжение, коммутируемых на вход цифрового вольтметра в соответствующих режимах работы.

Основными узлами цифровых вольтметров являются ключи, логические элементы, операционные усилители, триггеры, сравнивающие устройства (компараторы), интеграторы, цифро-аналоговые преобразователи, счетчики импульсов, отсчетные устройства.

2.4 Измерение частоты электромагнитных колебаний

2.4.1 Классификация приборов для измерения частоты и интервалов времени

Период – это наименьший интервал времени, через который повторятся мгновенные значения $x(t)$, то есть $x(t) = x(t+T)$.

Частота – в общем случае – характеризует число идентичных событий в единицу времени.

Для гармонического сигнала применяется понятие «**угловая частота**» – изменение фазы сигнала в единицу времени ($\omega = 2\pi f$).

Частотно-временные измерения могут быть не только абсолютными, но и относительными, при которых оценивается изменение частоты во времени – **нестабильность частоты**.

Долговременная нестабильность связана с систематическим смещением частоты за длительное время (> 100 с).

Кратковременная нестабильность определяется флуктуациями частоты (если интервал наблюдения менее 100 с).

Приборы для измерения частоты классифицируются следующим образом:

- Ч1 – стандарты частоты и времени;
- Ч2 – резонансные частотомеры;
- Ч3 – электронно-счетные частотомеры;
- Ч4 – гетеродинные, мостовые и емкостные частотомеры;
- Ч5 – синхронизаторы и преобразователи частоты;
- Ч6 – синтезаторы частоты, делители и умножители;
- Ч7 – приемники сигналов эталонных частот, компараторы и синхронометры;
- Ч8 – преобразователи частоты в другую электрическую величину.

В зависимости от диапазона и требуемой точности методы измерения частоты классифицируются следующим образом:

- метод перезаряда конденсатора;
- резонансный метод;
- метод сравнения (гетеродинный);
- метод дискретного счета (цифровой);
- осциллографический (будет рассмотрен в главе «Осциллографические измерения»).

Метод перезаряда конденсатора имеет низкую точность и ограниченный частотный диапазон и в настоящее время практически не используется.

2.4.2 Резонансные частотомеры

Метод, реализованный в резонансных частотомерах, основан на использовании явления электрического резонанса в колебательных системах. Он заключается в сравнении измеряемой частоты с собственной резонансной частотой колебательного контура. Структурная схема резонансного метода представлена на рисунке 2.22.

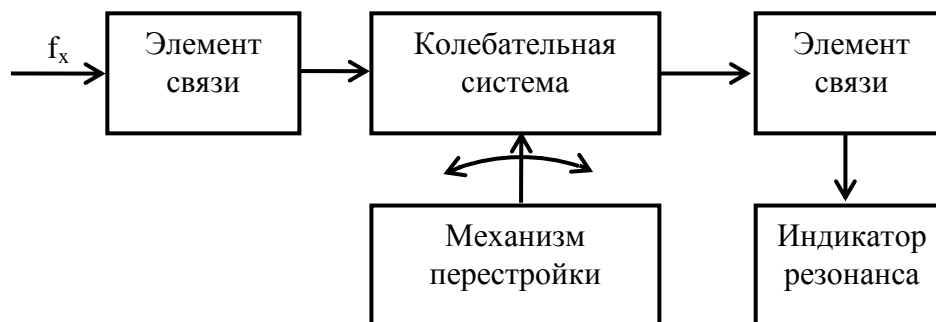


Рисунок 2.22 – Структурная схема резонансного частотомера.

С помощью элементов связи колебательная система подключается к источнику измеряемой частоты и индикатору; момент резонанса фиксируется с помощью индикатора, а значение измеряемой частоты отсчитывается по шкале, связанной с механизмом перестройки.

В зависимости от диапазона измеряемых частот в качестве колебательных систем используются **контур** с **сосредоточенными** или **распределенными постоянными**.

Резонансные частотомеры с сосредоточенными постоянными применяются в диапазоне частот 50 кГц – 200 МГц и представляют собой колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности и конденсатора. Точность настройки в резонанс тем выше, чем выше добротность контура.

Связи контура с объектом измерения и с индикатором резонанса должны быть минимальными для того, чтобы, с одной стороны, колебательный контур не влиял на источник колебаний измеряемой частоты, а с другой – чтобы вносимые в контур сопротивления не уменьшали его добротности.

При измерении контур настраивают в резонанс, а измеряемую частоту находят из формулы Томсона для резонансной частоты колебательного контура:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.40)$$

Обычно используются сменные катушки индуктивности и конденсаторы переменной емкости, что позволяет перекрыть достаточно широкий диапазон частот. С объектом измерения частотомер связан слабой индуктивной связью. Индикатор резонанса подключается к контуру либо через емкостный делитель, либо индуктивно.

На частотах выше 1000 МГц используются **контур** с **распределенными постоянными**.

В диапазоне частот до 10 ГГц колебательная система представляет собой четвертьволновую разомкнутую коаксиальную линию, нагруженную емкостью C . Индикатор состоит из детекторной секции и магнитоэлектрического микроамперметра. Индикатор резонанса связан с отрезком линии и с источником измеряемой частоты с помощью петли связи. При настройке такого частотомера в резонанс одновременно изменяются длина линии l и емкость C . Погрешность измерения частоты составляет $(0,1 - 0,5)\%$.

На частотах выше 10 ГГц в качестве колебательных систем применяются объемные резонаторы, представляющие собой отрезки волновода.

К основным параметрам резонансных частотомеров можно отнести

- диапазон измеряемых частот;
- погрешность измерения;
- чувствительность (минимальная мощность, необходимая для отклонения стрелки индикатора).

Источниками погрешностей резонансных частотомеров являются

- неточность настройки контура в резонанс;
- погрешность градуировки отсчетного устройства;
- разрешающая способность индикатора;
- люфт в механизме перестройки;
- изменение внешней температуры;
- влажность окружающей среды.

При точных измерениях вводится поправка на температуру и влажность.

2.4.3 Измерение частоты гетеродинным методом

Сущность гетеродинного метода заключается в сравнении частоты исследуемого сигнала с известной частотой сигнала перестраиваемого генератора (гетеродина). Как самостоятельные приборы гетеродинные частотомеры в настоящее время не выпускаются, но широко используются в гетеродинных преобразователях частоты, служащих для расширения пределов измерения цифровых частотомеров в сторону СВЧ.

Структурная схема гетеродинного частотомера представлена на рисунке 2.23.

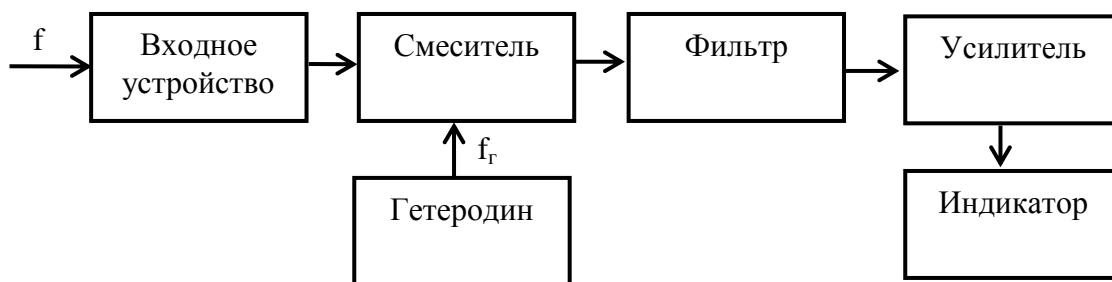


Рисунок 2.23 – Структурная схема гетеродинного частотомера

Измеряемая частота f_x понижается за счет смешивания колебаний с частотой f_x с колебаниями перестраиваемого гетеродина, частота которого f_r известна и имеет высокую стабильность. На выходе смесителя образуются сигналы комбинационных частот $\pm nf_r \pm mf_x$. Из всех этих частот путем фильтрации выделяется разностная частота $nf_r - mf_x$.

В зависимости от вида применяемого оконечного измерителя (индикатора) возможны различные методики измерения.

1) Получение нулевых биений.

Гетеродин перестраивают по частоте до нулевых биений, фиксируемых индикаторным прибором: $nf_r = mf_x$. Отсюда искомая частота $f_x = \frac{n}{m} f_r$.

2) Измерение разностной частоты.

В данном случае задача гетеродинного преобразования сводится к понижению измеряемой частоты до диапазона рабочих частот оконечного измерителя (осциллографа или цифрового частотомера). Измерив

разностную частоту $f_p = nf_r - mf_x$, получают $f_x = \frac{nf_r - f_p}{m}$. В данном случае

гетеродин выступает в качестве меры; следовательно, погрешность измерения частоты зависит от погрешности меры.

С помощью гетеродина можно расширить диапазон измеряемых частот до десятков ГГц.

В качестве источников погрешностей выделяют погрешность меры, погрешность сравнения и погрешность фиксации разностной частоты.

2.4.4 Метод дискретного счета. Электронно-счетные частотомеры

В настоящее время наиболее широко используются электронно-счетные частотомеры со знаковой индикацией результата измерений, в которых реализуется **метод дискретного счета** (цифровой метод измерения частоты). **Сущность этого метода** заключается в подсчете числа периодов неизвестной частоты за определенный интервал времени.

По принципу действия электронно-счетные частотомеры относятся к приборам прямого преобразования, в которых производится подсчет числа идентичных событий за интервал времени измерения. В зависимости от значения этого интервала (временной базы) различают

- частотомеры средних значений, в которых измерение осуществляется за интервал времени $t_0 > T_x$, как в интегрирующих цифровых приборах;

- частотомеры мгновенных значений, в которых осуществляется измерение частоты за один период колебаний, как в неинтегрирующих цифровых приборах.

Наибольшее распространение получили частотомеры средних значений, структурная схема которых приведена на рисунке 2.24.

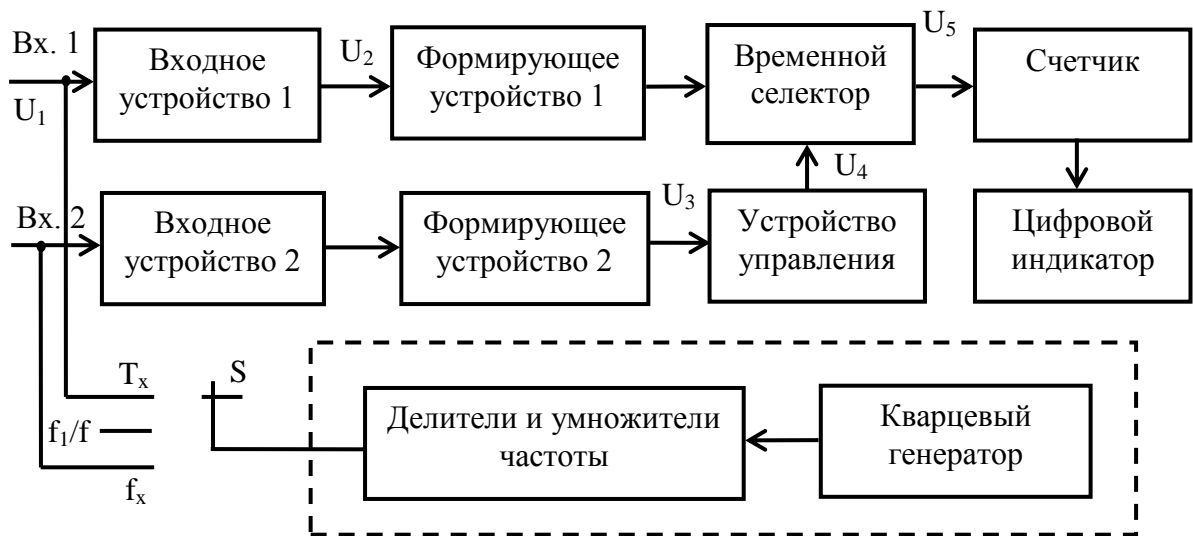


Рисунок 2.24 – Обобщенная структурная схема цифрового частотомера.

В режиме измерения частоты сигнал подается на вход **1**, а переключатель **S** находится в положении « f_x ». Формирующее устройство **1** (ФУ1) предназначено для преобразования гармонических сигналов в однополярные импульсы, следующие с периодом T_x , соответствующим f_x (счетные импульсы). На входе ФУ1 (входное устройство 1 ВУ1) включается компенсированный делитель напряжения или аттенуатор, с помощью которого устанавливается напряжение, необходимое для нормальной работы ФУ.

Для формирования меток времени предназначен блок образцовых частот (БОЧ) в составе кварцевого генератора с делителями и умножителями частоты. В ФУ2 формируются импульсы с периодом T_n , соответствующим образцовой частоте f_0 сигнала кварцевого генератора. БОЧ позволяет получить импульс временной базы с необходимой длительностью T_n или периодическую последовательность импульсов с калиброванным периодом. Формирование импульса T_n , который определяет время измерения и называется временем счета, осуществляется в устройстве управления (УУ). В этом же устройстве вырабатывается импульс сброса для обнуления счетчика и индикатора и сигнал для блокировки селектора. Блокировка селектора необходима для сохранения показаний индикатора на некоторый интервал времени. Селектор открывается на установленный интервал времени T_n и пропускает на счетчик импульсы, следующие с периодом T_x . Полученная информация с помощью дешифратора, входящего в состав индикатора, дешифрируется и отображается на цифровом табло в единицах измеряемой частоты.

Процесс измерения частоты иллюстрируется временными диаграммами, изображенными на рисунке 2.25.

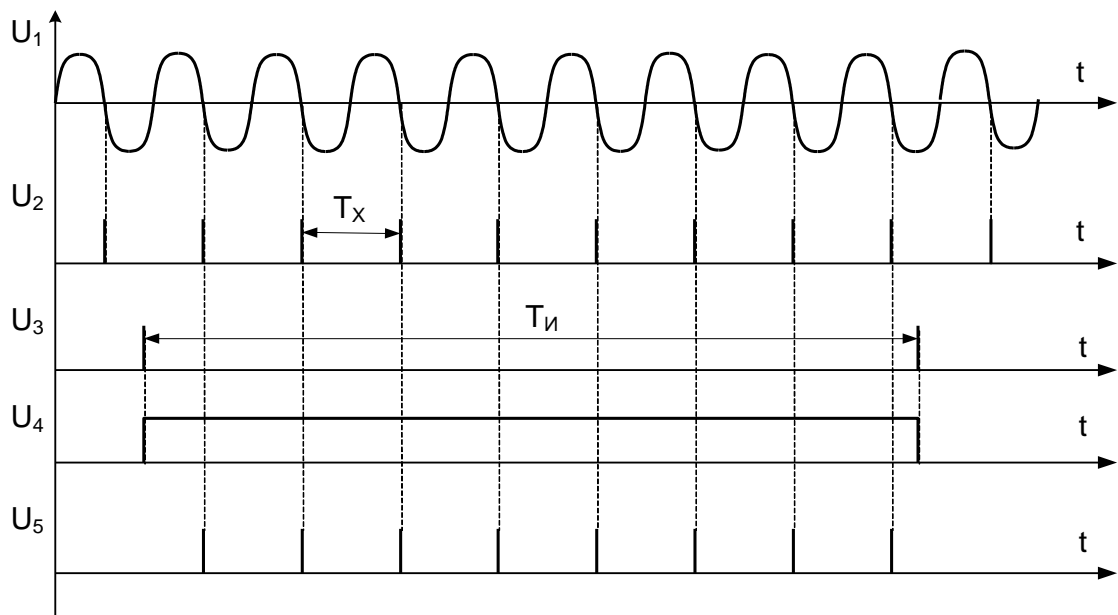


Рисунок 2.25 – Временные диаграммы, иллюстрирующие работу частотомера в режиме измерения частоты.

Счетные импульсы, сформированные из сигнала U_x , поступают на вход временного селектора (сигнал U_2). Селектор открыт во время действия импульса длительностью $T_{и}$, сформированного из сигнала БОЧ (сигнал U_4). Счетчик зафиксирует число импульсов N , которое без учета погрешности дискретности можно определить из формулы $T_{и} = N \cdot T_0$. Отсюда значение частоты будет определяться из соотношения

$$f_x = \frac{N}{T_{и}}. \quad (2.41)$$

Источниками погрешности при измерении частоты будут относительная нестабильность частоты кварцевого генератора δ_0 и погрешность дискретности, равная $1/N$. Погрешность дискретности обусловлена тем, что за время измерения счетчик сосчитает только целое количество импульсов, а часть периода будет потеряна в начале и в конце времени счета $T_{и}$. Наличие делителей частоты в БОЧ позволяет уменьшить погрешность дискретности при измерении низких частот.

При измерении периода переключатель S переводится в положение T_x , а измеряемый сигнал подается на вход 2. Интервал времени измерения определяется величиной T_x , а счетными являются импульсы, сформированные из частоты сигнала кварцевого генератора. Для уменьшения погрешности дискретности частота кварцевого генератора увеличивается требуемое число раз (при помощи умножителя частоты). Период сигнала можно определить по формуле

$$T_x = N \frac{t_0}{10^n}, \quad (2.42)$$

где t_0 – период меток времени;
 $n = 0, 1, 2, \dots$

В диапазоне низких и инфранизких частот (при больших значениях T_x и n) интервал времени измерения может быть равен T_x , то есть частота измеряется за один период сигнала. В этом режиме частотомер является неинтегрирующим. В реальных схемах предусматривается возможность измерения в течение нескольких периодов T_x с последующим усреднением результатов измерений. Интервал времени измерения регулируется в УУ и может быть равным $10^m T_x$. Тогда

$$T_x = N \frac{t_0}{10^{(n+m)}}. \quad (2.43)$$

Относительная погрешность измерения периода определяется таким же образом, как и для частоты.

Одним из способов повышения точности измерения низких частот является переход от измерения частоты к измерению периода. Кроме того, могут использоваться способы умножения измеряемой частоты, нониусный (верньерный) способ растяжки дробной части периода и преобразование частоты f_x в напряжение с последующим измерением его с помощью цифрового вольтметра.

С помощью электронно-счетного частотомера можно измерять отношение двух частот. В этом режиме переключатель S ставится в положение f_1/f_2 , сигнал с большей частотой (f_1) подается на вход 1, а сигнал с меньшей частотой (f_2) – на вход 2. Время счета T_n формируется из сигнала с частотой f_2 , а в качестве счетных используются импульсы, сформированные из сигнала с частотой f_1 . Количество импульсов N на выходе счетчика будет равно искомому отношению частот:

$$N = \frac{f_2}{f_1}. \quad (2.44)$$

Диапазон измеряемых частот сверху ограничен быстродействием счетчика и составляет примерно 200 МГц. Для расширения частотного диапазона в сторону ВЧ и СВЧ используются два способа: предварительное деление частоты входного сигнала и гетеродинное преобразование частоты.

2.5 Исследование формы электрических сигналов

Приборы, предназначенные для исследования формы и спектра сигналов, составляют одну из многочисленных групп средств измерений.

Осциллографами называются приборы, предназначенные для наблюдения, записи или фотографирования электрических процессов, которые изменяются во времени, и измерения их параметров.

Устройства, позволяющие получать зависимость амплитуд или мощностей гармонических колебаний, входящих в состав сложного сигнала, от частоты, называются **анализаторами спектра**.

Осциллографы и анализаторы спектра относятся к подгруппе С и делятся на виды:

С1 – осциллографы универсальные;

С4 – анализаторы спектра;

С7 – осциллографы скоростные и стробоскопические;

С8 – осциллографы запоминающие;

С9 – осциллографы специальные.

Наибольшее распространение получили универсальные электронные осциллографы, позволяющие исследовать различные электрические процессы в широком диапазоне амплитуд, длительностей и частот повторения сигналов. **В зависимости от схемных решений** их можно разделить на одноканальные, многоканальные и многофункциональные. **Многоканальность** достигается применением многолучевых электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) и коммутаторов сигналов. В **многофункциональных** осциллографах с помощью сменных блоков реализуются такие дополнительные функции, как измерение электрических и неэлектрических величин, анализ спектра сигналов, исследование характеристик радиотехнических цепей и устройств.

В **скоростных** осциллографах исследование формы колебаний СВЧ и кратковременных импульсных сигналов обеспечивается с помощью специальной ЭЛТ бегущей волны (ТБВ). Полоса пропускания таких осциллографов может превышать 1 ГГц.

Стробоскопическим называется осциллограф, в котором для получения изображения формы сигнала используется упорядоченный или случайный отбор мгновенных значений исследуемого сигнала и осуществляется временное преобразование сигнала. Такие осциллографы позволяют исследовать сигналы в полосе частот от 0 до 10 ГГц.

Запоминающий осциллограф представляет собой прибор, в котором с помощью специального устройства, например ЭЛТ с памятью или электронного запоминающего устройства, сохраняется на определенное время исследуемый сигнал и при необходимости представляется для однократного или многократного визуального наблюдения или для дальнейшей обработки.

К **специальным** осциллографам относятся приборы, предназначенные для исследования сигналов сложной формы типа телевизионного. Наряду с основными блоками такие осциллографы имеют устройства выделения строки, восстановления постоянной составляющей и т.п. Они широко применяются при

настройке телевизионной аппаратуры и, кроме специальных измерений, могут использоваться как широкополосные осциллографы.

2.5.1 Типовой универсальный электронный осциллограф (ЭО)

Обобщенная структурная схема типового одноканального универсального осциллографа представлена на рисунке 2.26.

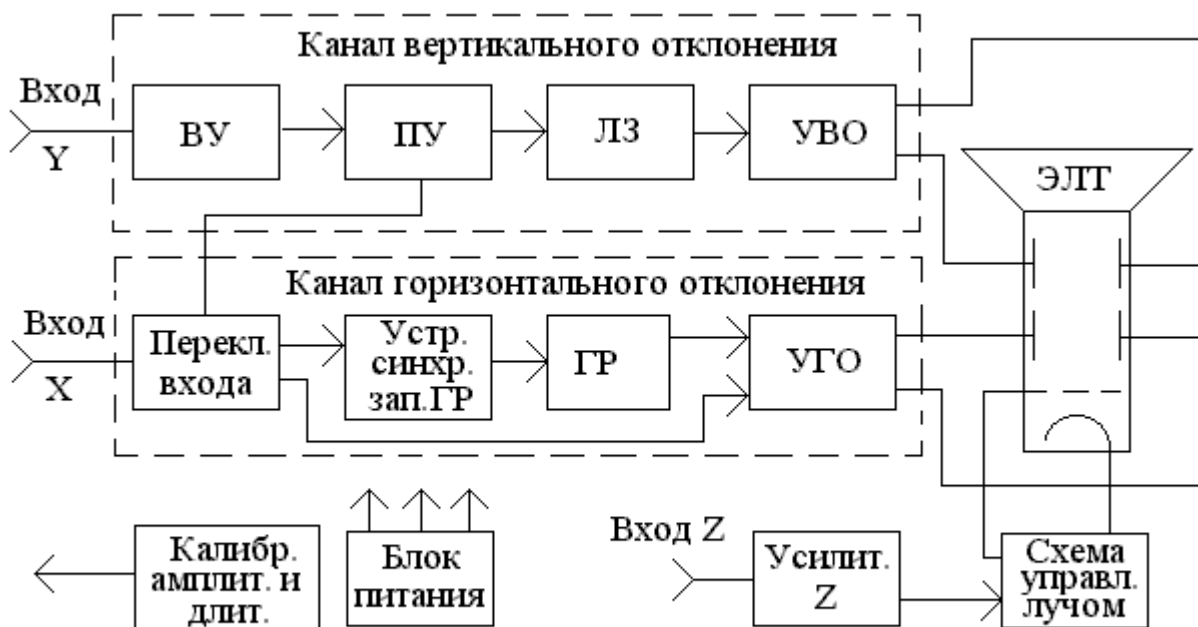


Рисунок 2.26 – Обобщенная структурная схема типового одноканального универсального осциллографа.

Схема ЭО состоит из ЭЛТ, канала вертикального отклонения Y, канала горизонтального отклонения X, канала яркости Z, калибраторов амплитуды и длительности, блока питания.

В современных осциллографах применяются ЭЛТ с электростатическим управлением лучом, имеющие достаточную широкополосность. На экране ЭЛТ воспроизводится изображение исследуемого процесса. Для этой цели необходимо, чтобы луч отклонялся по горизонтальной оси пропорционально времени, а по вертикальной оси – пропорционально исследуемому напряжению. Следовательно, ЭЛТ в основном влияет на такие важные технические характеристики ЭО, как погрешность измерений амплитудных и временных параметров, возможность наблюдения импульсов различной длительности, яркость свечения и продолжительность изображения на экране. Важными электрическими параметрами ЭЛТ являются чувствительность по вертикали и горизонтали, полоса пропускания и другие. К световым параметрам относятся ширина линии, скорость записи отдельных сигналов, яркость свечения экрана и времени послесвечения.

Для отсчета измеряемых величин перед экраном помещается сетка (шкала), которая наносится на прозрачный материал. Эта шкала имеет подсветку с использованием эффекта полного внутреннего отражения в толще материала. В некоторых ЭЛТ шкала наносится непосредственно на внутреннюю поверхность экрана, что позволяет уменьшить ошибки отсчета из-за параллакса. Площадь, ограниченная шкалой, определяет рабочую площадь экрана, в пределах которой гарантируются соответствующие технические характеристики ЭО.

Канал вертикального отклонения Y (канал сигнала) предназначен для согласования входа ЭО с исследуемым устройством, усиления исследуемых сигналов и преобразования их в два противофазных напряжения, которые подаются на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Канал состоит из входного устройства (ВУ), предварительного усилителя (ПУ), линии задержки (ЛЗ) и оконечного усилителя вертикального отклонения (УВО). ВУ предназначено для согласования входного сопротивления канала с исследуемым устройством и ослабления исследуемого сигнала для предотвращения перегрузки усилителя при больших значениях входного напряжения. В ПУ сосредоточены основные регулировки канала: плавная и ступенчатая регулировка усиления, балансировка усилителя постоянного тока и др. ЛЗ обеспечивает подачу исследуемого сигнала на вертикально отклоняющие пластины с задержкой относительно начала развертки, что дает возможность наблюдать фронт импульса и исключить нелинейность начального участка развертки. УВО необходим для получения осциллограммы слабых сигналов, т.е. для повышения чувствительности осциллографа.

Канал горизонтального отклонения X (канал развертки и синхронизации) предназначен для создания напряжения развертки по горизонтали, усиления сигналов синхронизации и преобразования импульсов синхронизации (в импульсных осциллографах) любой полярности в импульсы определенной полярности, необходимые для запуска развертки. Канал содержит устройство синхронизации и запуска развертки, генератор развертки (ГР), усилитель горизонтального отклонения (УГО) и переключатель. Устройство синхронизации и запуска развертки служит для усиления и регулировки амплитуды, а также для изменения полярности синхронизирующих напряжений. С помощью ГР обеспечивается получение напряжения развертки. В общем случае ГР вырабатывает напряжение пилообразной формы (**линейная непрерывная автоколебательная развертка**). При этом развертка запускается независимо от сигнала запуска. Это напряжение характеризуется длительностями прямого хода $T_{\text{П}}$, обратного хода $T_{\text{ОБР}}$ и блокировки и блокировки $T_{\text{БЛ}}$ (рисунок .2.27): $T_{\text{Р}} = T_{\text{П}} + T_{\text{ОБР}} + T_{\text{БЛ}}$.

Рабочим интервалом является время прямого хода, в течение которого напряжение на пластинах X линейно во времени:

$$U_{\text{X}} = \frac{U_{\text{m}}}{T_{\text{П}}} \cdot t, \quad 0 < t < T_{\text{П}},$$

где U_{m} – амплитуда напряжения развертки; t – текущее время.

В течение времени T_{Π} луч будет описывать на экране такую же функциональную зависимость, которую имеет исследуемый сигнал во времени. В течение времени обратного хода и блокировки ГР формирует импульс, поступающий в канал управления яркостью и гасящий луч ЭЛТ на время $T_{\text{О}} + T_{\text{БЛ}}$.

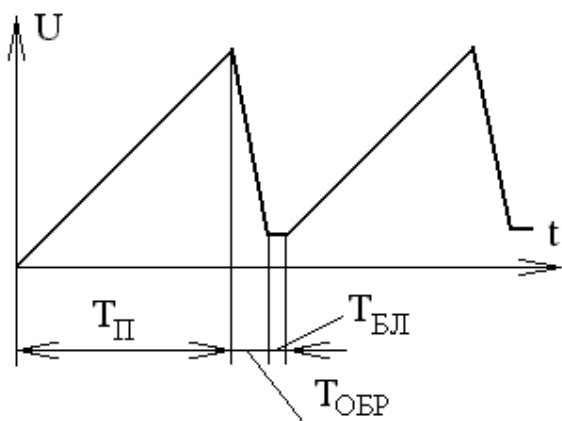


Рисунок 2.27

Чтобы получить на экране ЭЛТ хотя бы один полный период исследуемого напряжения, период напряжения развертки T_P должен быть кратен периоду исследуемого напряжения T_C , т.е. должно выполняться **условие синхронизации**:

$$T_P = n \cdot T_C, \quad (2.45)$$

где $n = 2, 3, \dots$ - целые числа.

На практике $n > 3$ брать нецелесообразно, т.к. ухудшается детальность

наблюдения сигнала. Если условие синхронизации не выполняется (n – дробное число), то на экране ЭЛТ получается неустойчивое бегущее изображение.

Для соблюдения данного условия и непрерывного поддержания устойчивого изображения необходимо синхронизировать развертку с исследуемым напряжением. Сущность синхронизации состоит в том, что вместе с изменением периода исследуемых колебаний T автоматически (синхронно) в осциллографе изменяется на такую же величину период развертки T_P . При этом начало периода развертки совпадает с началом периода сигнала.

Существенным недостатком непрерывной автоколебательной развертки является то, что она не обеспечивает наблюдение однократных импульсов малой длительности, а при исследовании процессов с большой скважностью этот режим неэффективен. Поэтому при исследовании указанных процессов используются другие виды разверток (**задержанная, задерживающая, ждущая, однократная, смешанная**). Выбор вида развертки зависит от характера исследуемого сигнала.

Задержанная развертка начинается с определенной задержкой после запускающего сигнала.

При **задерживающей развертке** используется два генератора развертки, один из которых является устройством переменной задержки для другого.

Ждущая развертка применяется для исследования сигналов с большой скважностью. При этом запуск генератора развертки производится только при наличии сигнала запуска.

Однократная развертка применяется для исследования однократных импульсов; при этом запуск генератора развертки производится один раз с последующей блокировкой на необходимое время.

Смешанная развертка применяется для исследования сигналов сложной формы. Скорость ее может быть различной в пределах рабочей части экрана.

Назначение усилителя горизонтального отклонения УГО аналогично назначению УВО.

Канал управления яркостью луча Z используется при измерении временных параметров периодических процессов.

Калибраторы амплитуды и длительности являются встроенными в осциллограф источниками сигналов с точно известными параметрами. Благодаря им обеспечивается возможность измерений амплитудных и временных параметров исследуемых сигналов.

Для расширения функциональных возможностей осциллографа канал Y может дополняться электронным коммутатором, с помощью которого на экране однолучевой ЭЛТ можно наблюдать осциллограммы нескольких сигналов. В этом случае ЭО становится многоканальным. Структурная схема цепей двухканального ЭО изображена на рисунке 2.28.

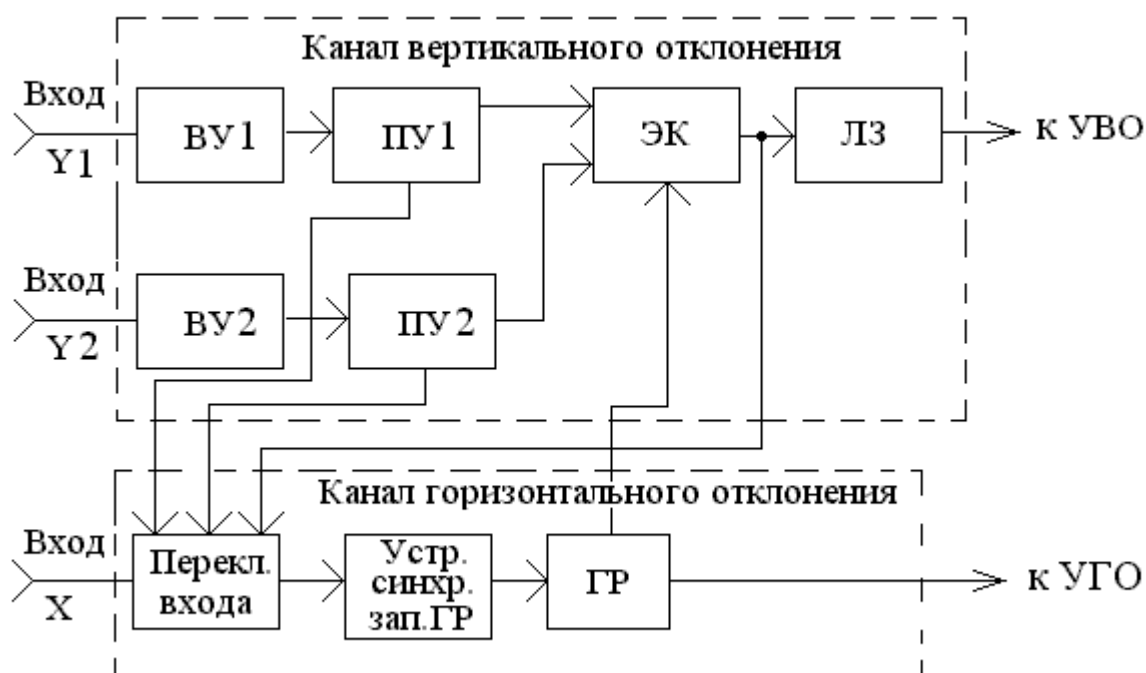


Рисунок 2.28 – Структурная схема двухканального осциллографа

С помощью электронного коммутатора (ЭК) осуществляется поочередная или одновременная подача сигналов с входов Y1 и Y2 на пластины Y ЭЛТ, чем и достигается эффект многоканальности.

2.5.2 Цифровые осциллографы

В цифровом осциллографе исследуемые аналоговые сигналы преобразуются с помощью АЦП в коды, которые далее запоминаются в дискретной памяти, реализуемой с помощью оперативного запоминающего устройства (ОЗУ).

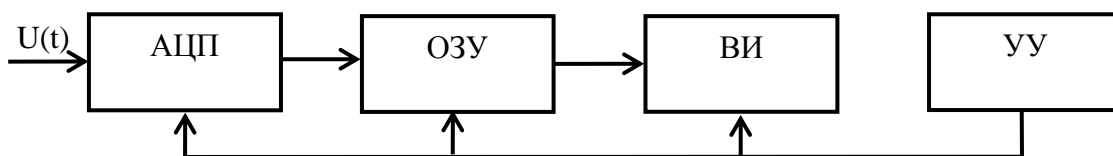


Рисунок 2.29 – Обобщенная структурная схема цифрового осциллографа (ЦО)

ОЗУ позволяет запомнить весь массив мгновенных значений $U(t)$, поступающих в виде кодов с АЦП, а также необходимую служебную информацию. Скорость записи в ОЗУ и его емкость оказывают существенное влияние на быстродействие и метрологические характеристики цифрового осциллографа.

Визуальные индикаторы (ВИ), применяемые в ЦО, можно разделить на две группы: ЭЛТ и матричные индикаторные панели (МИП). При использовании ЭЛТ необходимы дополнительные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), преобразующие коды ОЗУ в напряжение сигнала $U(t)$, поступающее на пластины Y, и напряжение развертки, подаваемое на пластины X ЭЛТ. При переходе к МИП необходимость в ЦАП отпадает.

Управление работой ЦО осуществляется тактовыми импульсами управляющего устройства (УУ). В АЦП реализуется кодо-импульсный метод преобразования при развертывающем уравнивании с равномерно-ступенчатым изменением компенсирующего напряжения. Благодаря этому имитируется временная развертка осциллографа.

2.5.3 Осциллографические измерения

При использовании осциллографа параметры сигналов определяют по их осциллограммам. Достоверность результатов зависит от точности воспроизведения осциллограмм. Погрешности измерения зависят от правильного выбора осциллографа, установки оптимальных размеров осциллограммы, выбора вида синхронизации и других факторов. При этом погрешность воспроизведения осциллограммы зависит от линейных (частотных) и нелинейных искажений сигналов.

2.5.3.1 Измерение напряжений

С помощью электронного осциллографа можно измерять как постоянное напряжение (при наличии открытого входа Y), так и мгновенное, максимальное, минимальное значения и размах сигнала.

Напряжение может быть измерено **методом прямого преобразования и методом сравнения**. При использовании метода прямого преобразования (**калиброванного отклонения**) с помощью калибратора амплитуды предварительно калибруется требуемый коэффициент отклонения K_v , который является ценой деления шкалы, нанесенной на экран. Значение напряжения в этом случае можно определить по формуле

$$U_x = K_v \cdot h, \quad (2.46)$$

где H – отклонение луча на экране осциллографа, соответствующее измеряемому значению сигнала.

Суммарная погрешность измерения напряжения данным методом зависит от погрешности, возникающей при калибровке коэффициента отклонения, погрешности из-за неравномерности переходной характеристики и визуальной погрешности.

Погрешность измерений может быть уменьшена при использовании **метода сравнения** и двухканального осциллографа или осциллографа с дифференциальным входом. На один вход подается исследуемый сигнал, а на второй – образцовое постоянное или переменное напряжение. Совмещая изображение калибровочного сигнала с границами осциллограммы исследуемого сигнала, определяют с помощью вольтметра значение калибровочного сигнала, а следовательно, искомое значение напряжения.

2.5.3.2 Измерение временных параметров и параметров импульсов

Временные интервалы, так же, как и напряжения, могут быть измерены методом прямого преобразования и методом сравнения. В первом случае перед измерением калибруется длительность прямого хода развертки, т.е. устанавливается необходимое значение коэффициента развертки K_p с помощью калибратора длительности. Измеренный интервал времени определяется по формуле

$$t = K_p \cdot l, \quad (2.47)$$

где l – размеры исследуемого участка осциллограммы по горизонтали.

Погрешность измерения временных интервалов зависит от погрешности калибровки временного интервала и визуальной погрешности.

Метод сравнения реализуется с помощью калибрационных меток, которые формируются из сигнала с известным периодом и при подаче его на вход Z накладываются на изображение сигнала. Совмещая метки с границами исследуемого временного интервала, по периоду меток и их количеству определяют значение измеряемого временного интервала.

2.5.3.3 Измерение частоты

Измерение частоты производится методом сравнения с частотой образцового генератора. Осциллограф в этом случае играет роль индикатора равенства или кратности измеряемой f_x и образцовой f_0 частот и погрешности в результате измерения практически не вносит.

Наиболее часто используются две разновидности этого метода: **метод интерференционных фигур** и **метод круговой развертки с модуляцией яркости**.

При использовании **метода интерференционных фигур** генератор развертки выключается, и сигнал образцовой частоты подается на вход X, а неизвестной – на вход Y осциллографа. На экране появляется интерференционная фигура (рисунок 2.30 а).

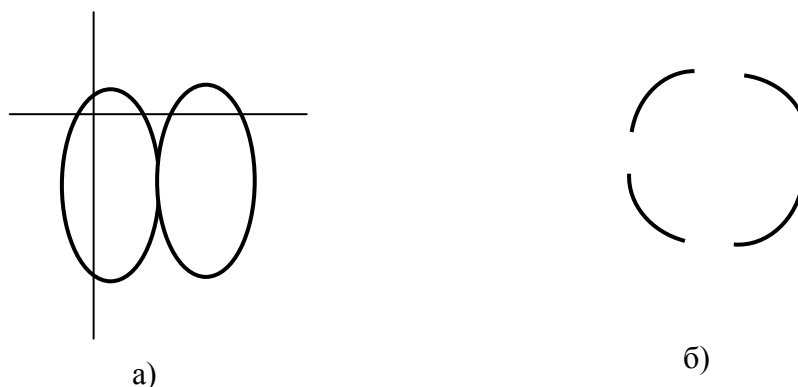


Рисунок 2.30 – Измерение частоты

Вид интерференционной фигуры зависит от соотношения частот и фаз сигналов. Кратность частот по интерференционным фигурам определяется следующим образом. На полученной фигуре мысленно проводится вертикальная прямая, не пересекающая узлы (рисунок 2.30 а). Подсчитывается число пересечений n_v вертикальной прямой с линиями фигуры. Аналогично находится число пересечений горизонтальной прямой с линиями фигуры n_r . Из уравнения $n_r \cdot f_0 = n_v \cdot f_x$ определяется значение измеряемой частоты f_x .

С увеличением отношения частот усложняется вид интерференционной фигуры, что затрудняет отсчет числа пересечений. При большой кратности частот применяют метод круговой развертки с модуляцией яркости. Круговая развертка создается напряжением образцового генератора. Сигнал образцовой частоты в виде двух напряжений с фазовым сдвигом 90° подается на входы X и Y осциллографа, а напряжение с частотой f_x подается на вход Z. На экране получается изображение, показанное на рисунке 2.30 б. Число темных и светлых участков равно кратности частот n , а частота $f_x = n \cdot f_0$.

[2.5.3.4 Измерение фазовых сдвигов](#)

Измерение фазовых сдвигов измеряется **методом наложения** и **методом эллипса**.

Наибольшее распространение получил **метод наложения**. При наличии двухканального осциллографа исследуемые сигналы подаются на входы Y1 и Y2, и на экране получается картина, изображенная на рисунке 2.31а.

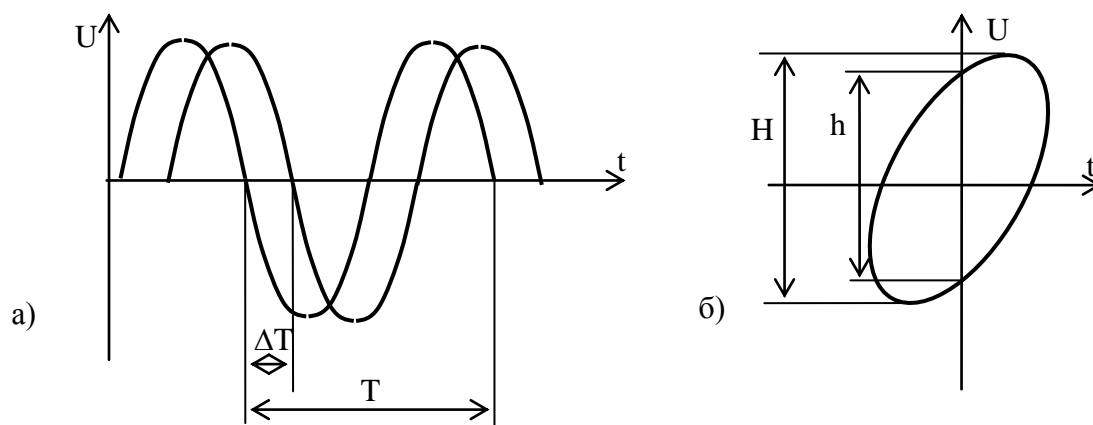


Рисунок 2.31 – Измерение фазового сдвига

В этом случае искомый фазовый сдвиг рассчитывается по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T}{T} \cdot 360^\circ. \quad (2.48)$$

При измерении фазового сдвига методом эллипса исследуемые сигналы подаются на входы X и Y осциллографа, и на экране появляется картина, изображенная на рисунке 2.31 б. Искомый фазовый сдвиг равен

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{h}{H}. \quad (2.49)$$

2.6 Измерение параметров цепей с сосредоточенными постоянными

Электрические цепи представляют собой совокупность соединенных друг с другом элементов – источников электрической энергии и нагрузок в виде резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов. При определенном допущении эти элементы можно рассматривать как линейные пассивные двухполюсники с сосредоточенными постоянными, характеризующиеся некоторыми идеальными параметрами: сопротивлением **R**, индуктивностью **L**, емкостью **C**. Кроме того, для колебательных цепей и катушек индуктивности непосредственно измеряется важный вторичный параметр – добротность **Q**, а для конденсаторов – тангенс угла потерь **tgδ**.

Различают следующие методы измерения параметров цепей с сосредоточенными постоянными:

- 1) метод вольтметра – амперметра;
- 2) метод непосредственной оценки;
- 3) мостовой метод;
- 4) резонансный метод;
- 5) метод дискретного счета.

Наибольшее распространение получили мостовой и резонансный методы измерения.

Значения параметров цепей могут изменяться в широких пределах при изменении частоты приложенного напряжения, в зависимости от протекающих токов и внешних условий (температуры, влажности, давления). Поэтому при измерении параметров цепей всегда стремятся проводить измерение на той частоте и в тех условиях, в которых данная деталь будет работать в аппаратуре.

2.6.1 Метод вольтметра – амперметра

Метод вольтметра – амперметра сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым двухполюсником и последующему его расчету по закону Ома. Таким способом можно измерять активное и полное сопротивление (на постоянном и переменном токе), индуктивность и емкость.

2.6.1.1 Измерение активного сопротивления

Схемы включения измерительных приборов приведены на рисунке 2.32.

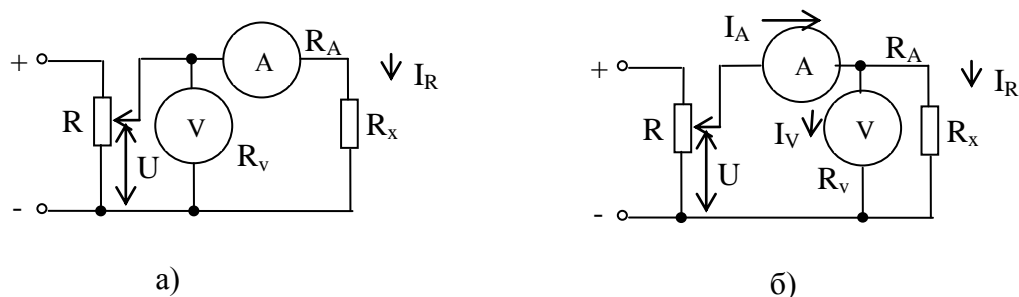


Рисунок 2.32 – Схемы включения измерительных приборов в методе амперметра-вольтметра (а – для больших R_x , б – для малых R_x).

Для измерения полного сопротивления на переменном токе применяются те же схемы, но схема а – для измерения малых сопротивлений, а схема б – для измерения больших сопротивлений.

Искомое сопротивление можно найти, зная I_x и U_x , по закону Ома.

2.6.1.2 Измерение емкости

Для измерения емкости конденсатора метом амперметра-вольтметра применяются схемы, приведенные на рисунке 2.33 (а – для измерения малых емкостей, б – для измерения больших емкостей).

В этом случае реактивное сопротивление конденсатора будет равно

$$X_c = \frac{U_c}{I} = \frac{j}{\omega C_x}, \quad (2.50)$$

а емкость находится по формуле

$$C_x = \frac{I}{\omega U_c}, \quad (2.51)$$

где ω - частота, на которой производится измерение.

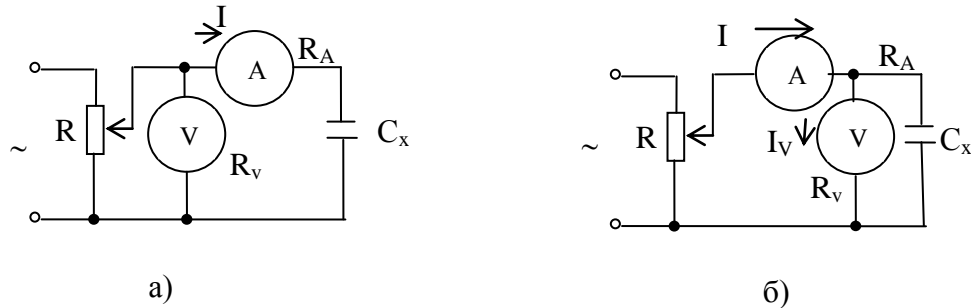


Рисунок 2.33 - Схема измерения емкости конденсатора методом амперметра – вольтметра

2.6.1.3 Измерение индуктивности

Измерение индуктивности методом амперметра – вольтметра возможно, если активное сопротивление катушки намного меньше ее реактивного сопротивления. Применяются те же схемы, что и для измерения емкости, только конденсатор заменяется катушкой индуктивности. Тогда искомая индуктивность будет равна

$$L = \frac{U_L}{I\omega}. \quad (2.52)$$

Если требуется получить более точный результат, то необходимо учитывать сопротивление катушки

$$Z = \frac{U_L}{I} = \sqrt{R_L^2 + \omega^2 L^2}, \quad (2.53)$$

откуда

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R_L^2}. \quad (2.54)$$

Погрешность измерения параметров двухполюсников на низких частотах составляет (0,5 – 10) % и увеличивается с ростом частоты.

Источниками погрешностей являются погрешности измерительных приборов (амперметра и вольтметра) и паразитные параметры измеряемых объектов.

2.6.2 Метод непосредственной оценки

Метод непосредственной оценки реализуется с помощью применения электромеханических и электронных омметров.

В электромеханических омметрах, как правило, используются магнитоэлектрические измерительные механизмы. Для измерения больших сопротивлений электромеханические омметры выполняются по схеме с последовательным включением измерительного механизма, а для измерения малых сопротивлений – по схеме с параллельным включением измерительного механизма.

2.6.3 Мостовой метод измерения параметров цепей. Измерительные мосты

Мостовой метод является одной из разновидностей метода сравнения. Приборы, основанные на мостовом методе, называются мостами постоянного и переменного тока, в зависимости от характера напряжения питания.

Мостовая измерительная цепь (МИЦ) в общем случае состоит из четырех сопротивлений $Z_1 - Z_4$, имеющих в общем случае комплексный характер и образующих две параллельные ветви к источнику питания ИП (рисунок 2.34).

В диагональ «аб» включен индикатор равновесия И (гальванометр), и эта диагональ называется **индикаторной диагональю**.

Как известно, схема моста находится в равновесии, если ток в индикаторной диагонали отсутствует. При этом показания индикатора равны нулю. В данном случае МИЦ реализует одну из основных модификаций метода сравнения – нулевой метод.

Моменту равновесия МИЦ соответствует равенство потенциалов точек

«а» и «б», что возможно только тогда, когда падения напряжений в плечах Z_1 и Z_4 , Z_2 и Z_3 будут равны между собой, т.е. $I_1 \cdot Z_1 = I_2 \cdot Z_4$; $I_1 \cdot Z_2 = I_2 \cdot Z_3$ при $I_{И} = 0$. Отсюда следует условие равновесия (баланса) МИЦ:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (2.55)$$

Учитывая, что $Z_1 \dots Z_4$ величины комплексные, условие (2.55) можно записать в виде условия баланса амплитуд

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4| \quad (2.56)$$

и баланса фаз

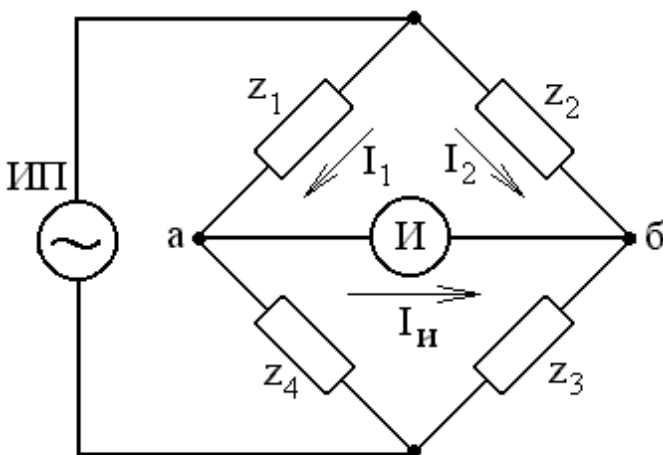


Рисунок 2.34

$$\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_4. \quad (2.57)$$

Следовательно, для уравнивания моста необходимо произвести минимум две настройки: подобрать модули сопротивлений и фазы. Обычно для этой цели в одном из плеч изменяют реактивную и активную составляющие сопротивлений. Очевидно, что при изменении одной из них происходит одновременное изменение как модуля, так и фазы. Поэтому равновесие моста может быть достигнуто лишь методом последовательных приближений. Это требует наличия не менее двух регулируемых элементов. Кроме того, условие (2.55) предполагает лишь ограниченное число комбинаций сопротивлений плеч по характеру активного и реактивного сопротивления, при которых возможно уравнивание. Это и определяет правила построения МИЦ:

- если в двух смежных плечах могут быть включены активные сопротивления, то в двух других плечах могут быть включены катушки индуктивности или конденсаторы;

- если активные сопротивления включены в противоположные плечи, то в одно из двух противоположных плеч может включаться катушка индуктивности, а в другое – конденсатор.

Если одно из сопротивлений плеч, например Z_1 , неизвестно, то уравнивая мост, можно найти значение этого сопротивления из общего условия равновесия моста.

Представляя комплексное сопротивление в виде эквивалентной схемы с параллельным или последовательным соединением активной и реактивной составляющих (параллельной или последовательной схемы замещения), можно определить соответствующие значения параметров измеряемого двухполюсника.

В качестве источников питания в мостах переменного тока применяется сеть 220 В 50 Гц или генераторы звуковой и высокой частоты. Напряжение источника питания моста должно быть чисто синусоидальным.

Индикаторами нуля служат гальванометры, а также электронные вольтметры.

Погрешности мостового метода измерения определяются в первую очередь **чувствительностью моста**, под которой понимают различное изменение показаний индикатора $\Delta\alpha$, отнесенное к вызвавшему его изменению параметра (в данном случае сопротивление одного из плеч ΔZ):

$$S_M = \frac{\Delta\alpha}{\Delta Z} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta I_{II}} \cdot \frac{\Delta I_{II}}{\Delta Z} = S_I \cdot S_{МИЦ}, \quad (2.58)$$

где ΔI_{II} – изменение тока через индикатор, пропорциональное $\Delta\alpha$;

S_I – чувствительность индикатора по току;

$S_{МИЦ}$ – чувствительность МИЦ, которого максимальна для равноплечих МИЦ (когда $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$).

Другой важной характеристикой моста является **сходимость** – способность моста придти к состоянию равновесия путем большего или

меньшего числа последовательных регулировок его элементов. Хотя это число в принципе может быть равно двум, на практике требуется большее число регулировок, так как изменение сопротивления любого элемента моста одновременно влияет и на баланс амплитуд, и на баланс фаз. Необходимы, таким образом, поочередные переходы от регулировки одного элемента к регулировке другого.

Кроме того, в суммарную погрешность измерения входят погрешности калибровки и градуировки сопротивлений в плечах моста. Дополнительные погрешности определяются паразитными связями элементов моста, источника питания и индикатора друг с другом и с окружающими предметами.

Для уменьшения влияния паразитных связей применяется экранирование, симметрирование плеч и рациональный выбор точек заземления. Суммарная погрешность измерения с помощью мостов переменного тока изменяется в пределах $\pm(1-3)\%$.

Измерительные мосты классифицируются по целому ряду признаков. По типу источников питания мосты подразделяются на мосты постоянного и переменного тока. В зависимости от количества плеч различают четырехплечие и многоплечие мосты. В зависимости от структуры двухполюсников, образующих плечи МИЦ, выделяют мосты типов МЕ (для измерения емкости C), МИ (для измерения индуктивности L), МИЕ (для измерения C и L), МЕП (для измерения C и $\text{tg}\delta$), МИП (для измерения L и Q) и МИЕП (универсальные).

2.6.3.1 Измерительные мосты постоянного тока

Область применения мостов постоянного тока ограничивается измерением активного сопротивления R_x , и они дополняют омметры, являясь по сравнению с ними не только более сложными, но и значительно более точными приборами.

Простейшая схема одинарного моста постоянного тока является частным случаем схемы, изображенной на рисунке 2.34, у которой $Z_1 = R_x$, $Z_2 = R_2$, $Z_3 = R_3$, $Z_4 = R_4$. Общее условие равновесия моста постоянного тока тогда будет иметь вид

$$R_x \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4,$$

откуда и находится неизвестное сопротивление R_x . На практике уравнивание МИЦ может осуществляться двумя способами:

- изменением R_2 при $R_4/R_3 = \text{const}$ (магазинные мосты);
- изменением R_4/R_3 при $R_2 = \text{const}$ (линейные мосты).

Наибольшее распространение получили магазинные мосты, т.к. R_2 можно конструктивно выполнить в виде высокоточного магазина сопротивлений, а для расширения пределов R_x можно изменять ступенями, кратными 10.

Если в качестве индикатора у моста применяется высокочувствительный магнитоэлектрический микроамперметр или гальванометр, то диапазон измерения R_x будет $1 \dots 10^5$ Ом.

2.6.3.2 Измерительные мосты переменного тока

В зависимости от величины измеряемого параметра двухполюсника (емкости, индуктивности, добротности и тангенса угла потерь) различаются и варианты построения мостовой схемы. Схема для измерения емкости конденсатора с малыми потерями C_X представлена на рисунке 2.35.

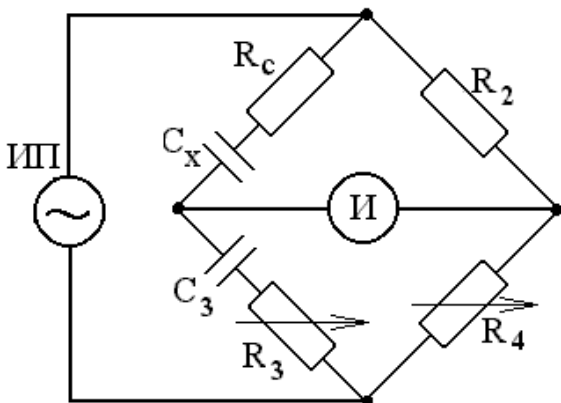


Рисунок 2.35

Условие равновесия данного моста можно записать в следующем виде:

$$R_2 \left(R_3 - \frac{1}{j\omega C_3} \right) = R_4 \left(R_C - \frac{1}{j\omega C_X} \right), \quad (2.59)$$

где R_C – сопротивление, эквивалентное потерям в конденсаторе.

Решив уравнение относительно неизвестных параметров, получим

$$C_X = C_3 \frac{R_4}{R_2}, \quad R_C = R_3 \frac{R_2}{R_4}. \quad (2.60)$$

Качество конденсаторов характеризуется величиной тангенса угла потерь

$$\text{tg} = \frac{R_C}{\frac{1}{\omega C_X}} = \omega \cdot C_3 \cdot R_3. \quad (2.61)$$

Отсюда видно, что для равновесия моста достаточно изменять активные сопротивления, оставляя емкость C_3 постоянной. Обычно для балансировки используется переменный резистор R_4 , градуированный в значениях $\text{tg}\delta$. Расширение пределов измерения C_X достигается изменением сопротивления R_2 .

Аналогично можно изобразить схему моста для параллельной схемы замещения реального конденсатора, соответствующей большим потерям в конденсаторе.

Схема рисунка 2.35, равно как и схема с параллельной схемой замещения реального конденсатора, при измерении C_X оказывается частотно-независимой. Это является важным достоинством мостов типа МЭП и позволяет применять их для измерения C_X на рабочей частоте.

Схема для измерения индуктивности при значении добротности катушки $Q_L < 30$ представлена на рисунке 2.36. В качестве образцовой меры по-прежнему применяется конденсатор.

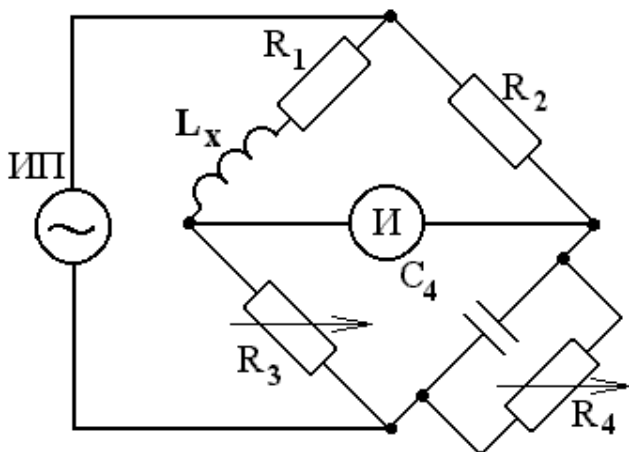


Рисунок 2.36

В данном случае используется параллельная схема замещения образцового конденсатора. Условие баланса будет выглядеть следующим образом:

$$(\mathbf{R}_L + j\omega L_X) \cdot \left(\frac{\mathbf{R}_4}{1 + j\omega C_4 \mathbf{R}_4} \right) = \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3,$$

где \mathbf{R}_L – активное сопротивление катушки индуктивности.

В итоге получим

$$L_X = C_4 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3, \quad \mathbf{R}_L = \frac{\mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3}{\mathbf{R}_4}. \quad (2.62)$$

Добротность катушки

$$Q_L = \frac{\omega L_X}{\mathbf{R}_L} = \omega C_4 \mathbf{R}_4. \quad (2.63)$$

В данном случае балансировка моста достигается с помощью двух переменных резисторов: \mathbf{R}_3 , отградуированного в значениях L_X , и \mathbf{R}_4 , отградуированного в значениях Q_L . Расширение пределов измерения L_X осуществляется с помощью измерения сопротивления \mathbf{R}_2 .

При $Q_X > 30$ мост строится по последовательной схеме замещения образцового конденсатора.

Как и мост типа МЭП, данный мост частотно независим при измерении.

2.6.4 Резонансный метод измерения параметров цепей

Резонансный метод измерения параметров цепей основан на использовании резонансных свойств колебательных систем, в частности, контуров с сосредоточенными параметрами. Основным достоинством резонансного метода является возможность измерения параметров на рабочей частоте.

Относительно просто резонансным методом измеряются емкость и индуктивность. Для этого достаточно составить контур (рисунок 2.37 а, б) из образцовой индуктивности (или емкости) и измеряемой емкости (соответственно индуктивности).

Контур индуктивно связывается с генератором, причем связь должна быть слабой. Настраивая контур в резонанс с частотой генератора (изменением

частоты на рисунке 2.37,а или образцовой емкости C_0 на рисунке 2.37,б), можно вычислить измеряемую емкость или индуктивность из формулы Томсона для резонансной частоты колебательного контура:

$$C_X = \frac{1}{4\pi^2 f_P^2 L_0}, \quad (2.64)$$

$$L_X = \frac{1}{4\pi^2 f_P^2 C_{OP}}, \quad (2.65)$$

где f_P и C_{OP} – значения частоты и емкости при резонансе.

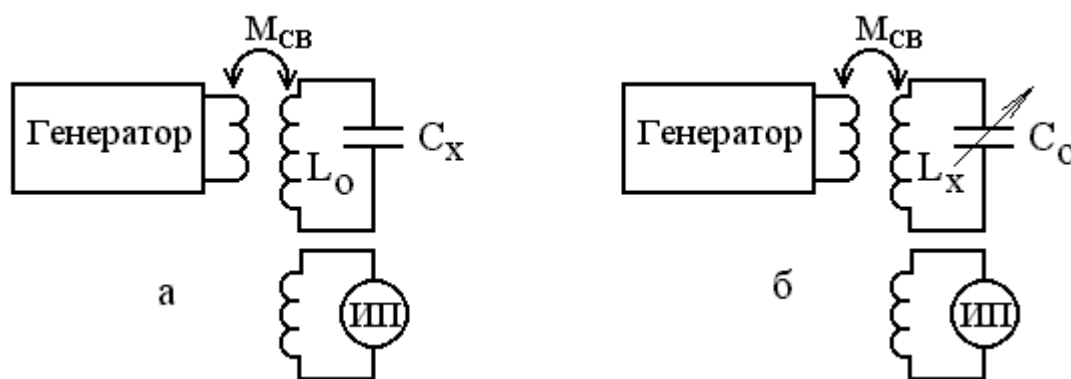


Рисунок 2.37 – Схема резонансного метода.

Индикатор резонанса ИП обычно включается в дополнительный контур с тем, чтобы не уменьшать добротность контура $L_0 C_X$ (или $L_X C_0$), а, следовательно, и точность измерений.

В описанном способе измерения L_X и C_X в этом случае $C_{OP} = (C + C_L)$ будет являться емкостью всего контура, представляющей собой сумму емкостей конденсатора и собственной емкости катушки C_L , а не емкостью конденсатора, и значение L_X будет определено неточно. Для определения истинного значения индуктивности необходимо определить значение собственной емкости катушки C_L . С этой целью необходимо проделать следующее:

- настроить контур в резонанс на двух различных частотах:

$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_X(C_1 + C_L)}}$$

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_X(C_2 + C_L)}};$$

- решить полученную систему уравнений относительно C_L .

Для повышения точности измерения объединяют резонансный метод с методом замещения. Суть метода замещения состоит в следующем: сначала настраивают контур в резонанс с некоторой образцовой емкостью C_0 , затем замещают C_0 искомой емкостью C_X и вновь настраивают контур в резонанс.

Для измерения малых емкостей методом замещения составляется схема, изображенная на рисунке 2.38, а.

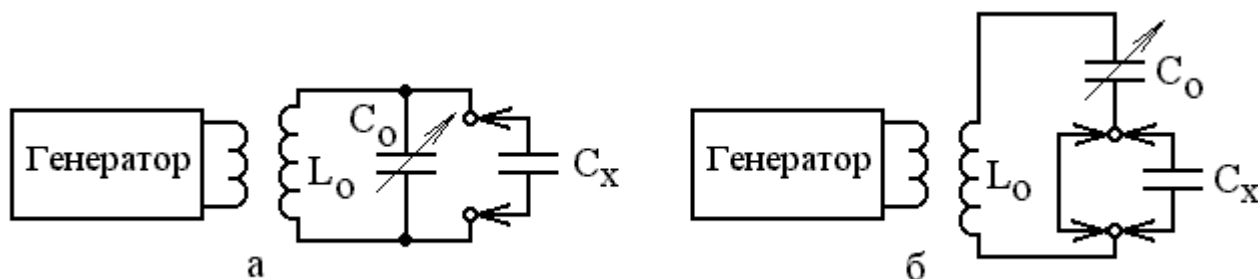


Рисунок 2.38 – Схема метода замещения

При отключенной C_X контур настраивают в резонанс измерением C_0 и в момент резонанса отсчитывают C_0' . Затем подключают C_X и изменением C_0 вновь настраивают контур в резонанс. Отсчитывают значение C_0'' . Тогда $C_X = C_0' - C_0''$, и паразитные емкости не влияют на результат измерения.

Для измерения больших емкостей применяется последовательное включение исследуемого конденсатора с образцовым (рисунок 2.38, б). Если контур без измеряемого конденсатора настраивается в резонанс при значении емкости образцового конденсатора C_0' , а при включении измеряемого конденсатора емкость образцового конденсатора должна быть увеличена до C_0'' , то значение емкости измеряемого конденсатора определяется из выражения $C_X = C_0' \cdot C_0'' / (C_0'' - C_0')$. Аналогичные схемы могут применяться и при измерении индуктивности. При этом погрешность измерения возрастает из-за паразитной связи между измеряемой катушкой и катушкой контура.

2.6.5 Метод дискретного счета

В основу метода дискретного счета положено преобразование измеряемого параметра в пропорциональный интервал времени и измерение этого интервала путем заполнения его счетными импульсами. На базе этого метода реализован цифровой измеритель емкости и индуктивности, схема которого представлена на рисунке 2.39.

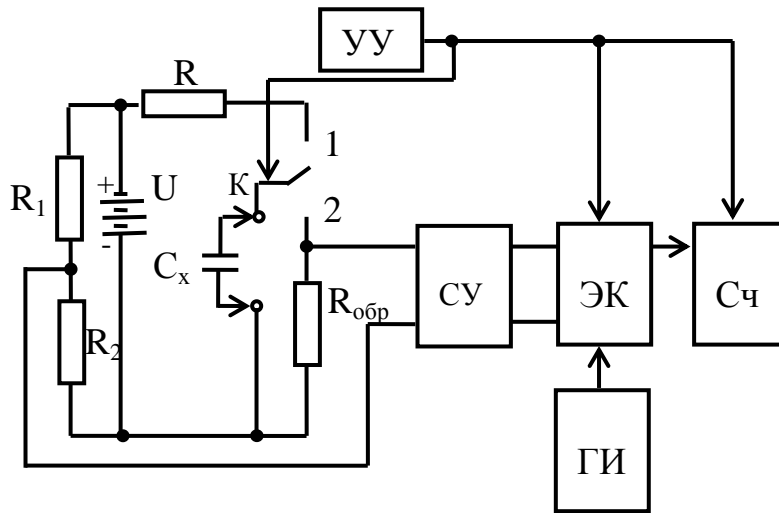


Рисунок 2.39 – Цифровой измеритель параметров двухполюсников

Перед началом измерений ключ K устанавливают в положение «1». При этом конденсатор C_x заряжается через ограничительный резистор R до напряжения источника U .

В момент начала измерения t_1 управляющее устройство (УУ) вырабатывает импульс, который сбрасывает предыдущее показание счетчика, открывает электронный ключ (ЭК) и переводит ключ K в положение «2». Конденсатор C_x разряжается через образцовый резистор $R_{обр}$ по экспоненциальному закону:

$$U_c = Ue^{-(t-t_1)\tau}, \quad (2.66)$$

где $\tau = R_{обр} \cdot C_x$ – постоянная времени цепи разряда.

В момент времени t_1 импульсы генератора импульсов (ГИ), следующие с частотой f_0 , начинают поступать на вход счетчика импульсов (Сч). Спустя время τ напряжение на конденсаторе $U_c = U/e = 0,37U$. Это напряжение подается на один из входов сравнивающего устройства (СУ), а ко второму входу СУ подводится напряжение $U_R = 0,37U$, снимаемое с резистора R_2 делителя напряжения (это напряжение подбирается изменением величин R_1 и R_2). В момент времени t_2 напряжение U_c становится равным U_R , и на входе СУ образуется второй импульс, закрывающий электронный ключ. Количество импульсов, зарегистрированных счетчиком, равно $N = f_0 \cdot \tau$. Так как $\tau = R_{обр} \cdot C_x$, то отсюда можно найти искомую емкость:

$$C_x = \frac{N}{R_{обр} f_0}. \quad (2.67)$$

Данный измеритель позволяет определять неизвестные параметры с точностью (0,1 ... 0,2)%, однако не дает возможности определять их на рабочей частоте.

2.7 Измерение фазового сдвига

К числу основных параметров электромагнитных колебаний, определяющих состояние колебательного процесса в заданный момент времени, относится фаза исследуемого сигнала. Для гармонического колебания

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

фаза φ определяется аргументом синусоидальной функции, линейно зависящей от времени: $\varphi = \omega t + \varphi_0$, где φ_0 – начальная фаза. Если начальные фазы двух синусоидальных колебаний с частотой ω обозначить соответственно φ_1 и φ_2 , сдвиг фаз будет равен $(\varphi_1 - \varphi_2)$. Следовательно, фазовый сдвиг является постоянной величиной и не зависит от момента времени отсчета.

Измерение фазовых сдвигов гармонических сигналов позволяет получить информацию о качестве радиоустройств, линий связи, технологических процессов и т. д. Для проведения таких измерений используются приборы подгруппы Ф (Ф2 – измерители фазовых сдвигов; Ф3 – измерительные фазовращатели; Ф4 – измерители группового времени запаздывания).

Наибольшее распространение получили следующие методы измерения фазовых сдвигов: метод суммы и разности напряжений, нулевой метод и метод преобразования фазового сдвига во временной интервал.

2.7.1 Метод суммы и разности напряжений

Сущность метода суммы и разности напряжений заключается в переносе информации об измеряемом фазовом сдвиге в амплитуду результирующего (суммарного или разностного) напряжения с последующим измерением этого напряжения аналоговым или цифровым вольтметром. Если два гармонических сигнала, описываемых выражениями

$$U_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ и}$$

$$U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

подать на схему сложения (сумматор), то их векторная сумма при $U_{m1} = U_{m2} = U_m$ будет равна

$$U_{mc} = 2U_m \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} . \quad (2.68)$$

С помощью схемы вычитания можно образовать разностное напряжение, которое равно

$$U_{mp} = 2U_m \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}. \quad (2.69)$$

Следует отметить, что для измерения фазового сдвига $\varphi_x = (\varphi_1 - \varphi_2)$ достаточно использовать только суммарную U_{mc} или разностную U_{mp} составляющие напряжения. Однако такой фазометр будет иметь пределы измерения от 0° до $+90^\circ$, неравномерную шкалу, а погрешность измерения фазовых сдвигов будет существенно зависеть от значения φ_x . Поэтому в практических схемах фазометров, реализующих метод суммы и разности напряжений, используются как суммарное, так и разностное напряжения.

Структурная схема одного из возможных вариантов построения такого фазометра приведена на рисунке 2.40.

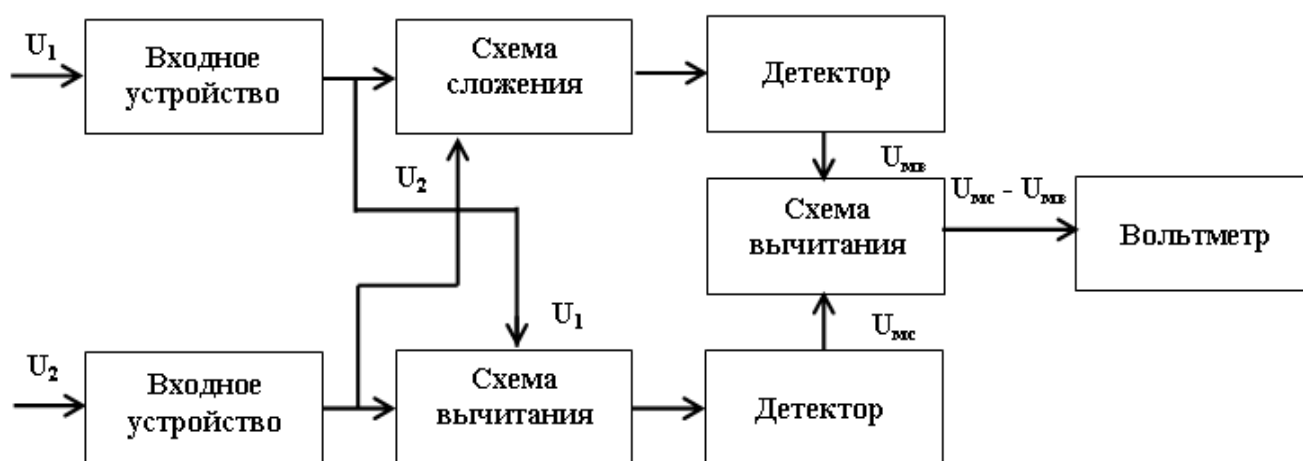


Рисунок 2.40 – Фазометр на базе метода суммы и разности напряжений

Входные сигналы U_1 и U_2 , амплитуды которых уравниваются с помощью входных устройств, подаются на схемы сложения и вычитания. На выходах этих схем после детектирования образуются суммарное и разностное напряжения, которые поступают на вторую схему вычитания. На ее выходе будет выделяться разностное напряжение, измеряемое аналоговым или цифровым вольтметром.

Зависимость $\frac{U_{mc} - U_{mp}}{2U_m}$ от φ_x (рисунок 2.41) оказывается практически

линейной, что позволяет при предварительной калибровке фазометра для устранения зависимости φ_x от U_m расширить пределы измерения до $\pm 180^\circ$. Следует отметить, что при измерении фазовых сдвигов фазометром, реализующим данный метод, наблюдается неоднозначность отсчета (кроме точек $+1$ и -1) значений измеренного фазового сдвига. Действительно, одному и

тому же значению разностного напряжения $\frac{U_{mc} - U_{mp}}{2U_m}$ соответствуют два

значения измеряемого фазового сдвига φ_x и φ_x' (рисунок 2.41). Действительное значение фазового сдвига можно определить путем дополнительного

измерения, при котором напряжение U_2 сдвигается по фазе с помощью дополнительного фазовращателя на небольшой фиксированный угол φ_0 .

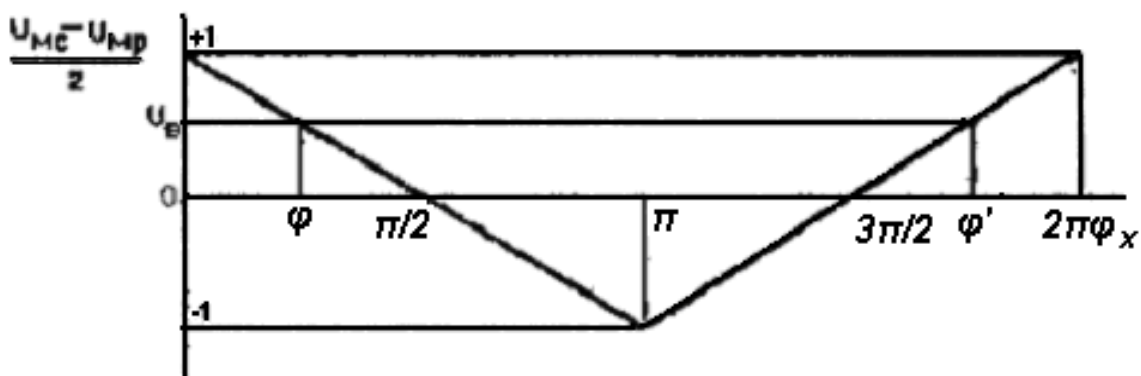


Рисунок 2.41 – График зависимости напряжения на выходе фазометра от фазового сдвига

Если показанию вольтметра U_v при первом измерении φ_x соответствуют два значения фазового сдвига φ и φ' , то после дополнительного сдвига фаз на угол φ_0 показания вольтметра для углов $\varphi_1 = \varphi + \varphi_0$ и $\varphi_2 = \varphi' + \varphi_0$ будут различны. Дополнительно измерив значение U_B' и пользуясь графиком (рисунок 2.41), легко определить действительное значение фазового сдвига φ_x . При $U_B > U_B'$ действительное значение фазового сдвига будет находиться в пределах $0 < \varphi_x < \pi$, а при $U_B < U_B'$ – в пределах $\pi < \varphi_x < 2\pi$.

Метод суммы и разности напряжений используется в фазометрах, работающих в широком диапазоне частот (до сотен ГГц), и обеспечивает измерение фазовых сдвигов с основной погрешностью, не превышающей $\pm(2-3)^\circ$. Данный метод используется также в приборах, предназначенных для контроля за постоянством фазового сдвига. При этом погрешность измерения уменьшается до десятых долей градуса.

2.7.2 Нулевой метод

Типовая структурная схема фазометра, реализующего нулевой метод измерения фазовых сдвигов, приведена на рисунке 2.42.

Входные сигналы U_1 и U_2 с помощью входных устройств выравниваются по амплитуде и поступают на измерительный (ИФВ) и установочный (УФВ) фазовращатели. В качестве индикаторного устройства (ИУ) могут использоваться индикаторы равенства фаз напряжений U_1' и U_2' , их противофазности или квадратурности.

Перед началом измерений фазометр калибруется с целью устранения собственного фазового сдвига, вносимого элементами схемы. Для этого указатель шкалы ИФВ устанавливается на нулевую отметку, на оба входа фазометра подаются один из исследуемых сигналов.

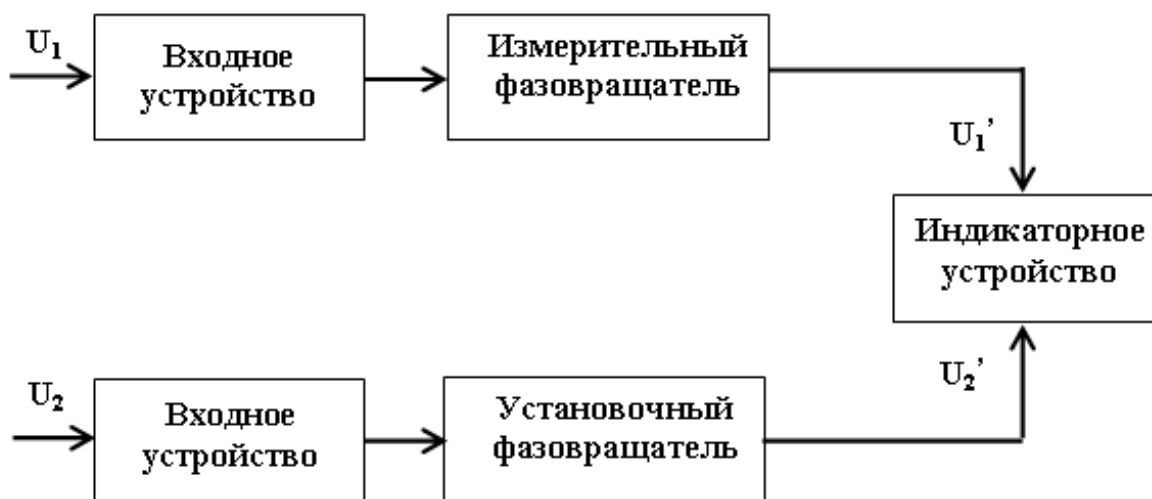


Рисунок 2.42 – Схема фазометра, реализующего нулевой метод

Изменением фазового сдвига, вносимого УФВ, добиваются нулевых показаний индикаторного устройства (ИУ), компенсируя тем самым собственный фазовый сдвиг фазометра. В режиме измерения начальная фаза напряжения U_1 с помощью ИФВ изменяется на величину φ_0 (образцовый фазовый сдвиг), и с помощью индикаторного устройства фиксируется величина $\Delta\varphi = \varphi_0 + \varphi_x$. При $\Delta\varphi = 0^\circ$ $\varphi_x = -\varphi_0$, т. е. измеренное значение фазового сдвига отсчитывается непосредственно по шкале ИФВ. При $\Delta\varphi = 180^\circ$ измеряемый фазовый сдвиг определяется по формуле $\varphi_x = 180^\circ - \varphi^\circ$.

В качестве индикатора значений $\Delta\varphi = 0^\circ$ и $\Delta\varphi = 180^\circ$ чаще всего используется электронно-лучевой осциллограф. При подаче напряжений U_1' и U_2' на входы X и Y электронно-лучевого осциллографа наблюдаемая на экране электронно-лучевой трубки интерференционная фигура будет иметь вид эллипса, параметры которого определяются значением измеряемого фазового сдвига φ_x . При синфазности напряжений, поступающих на входы X и Y осциллографа, эллипс "стягивается" в линию, которая наклонена вправо под углом 45° (при $U_1' = U_2'$). Если же $\Delta\varphi = 180^\circ$, линия будет наклонена влево также под углом 45° . Момент "стягивания" эллипса в линию может быть зафиксирован достаточно точно. Погрешность измерения фазового сдвига фазометром, реализующим нулевой метод, определяется в основном погрешностью градуировки шкалы ИФВ.

2.7.3 Метод преобразования фазовых сдвигов во временной интервал

Структурная схема фазометра, реализующего метод преобразования фазового сдвига во временной интервал, приведена на рисунке 2.43, временные диаграммы, поясняющие принцип его работы, представлены на рисунке 2.44.

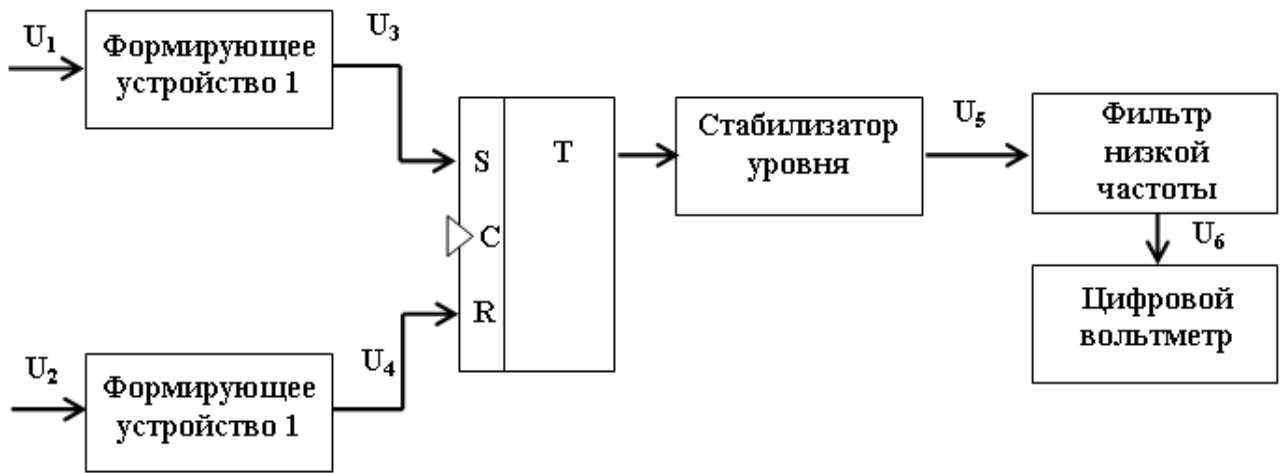


Рисунок 2.43 – Структурная схема цифрового фазометра

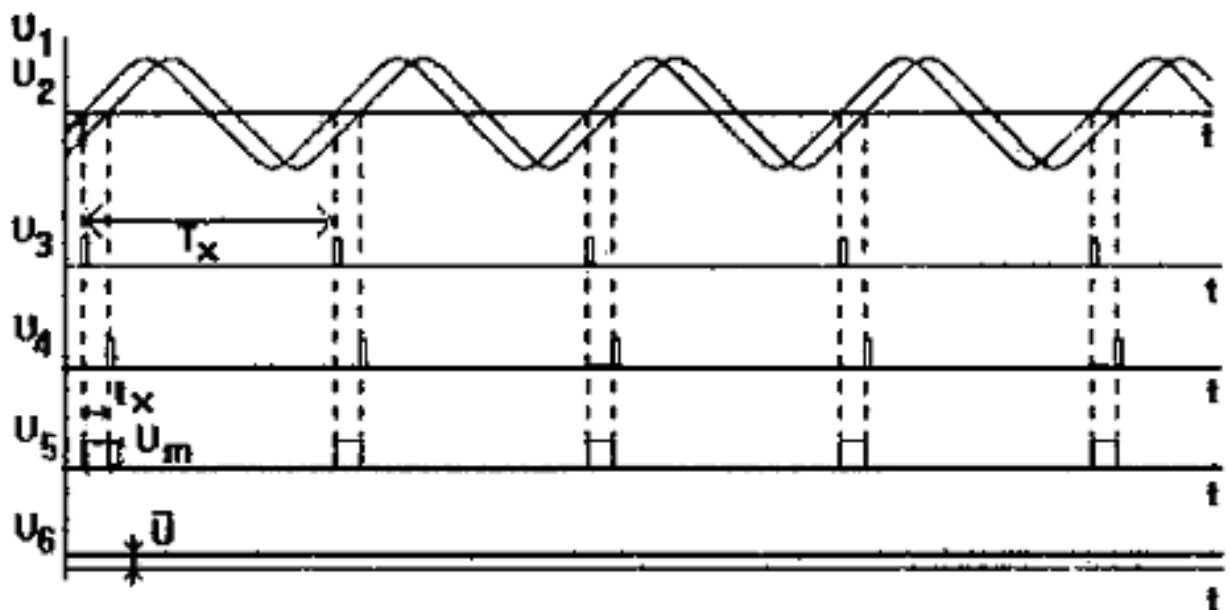


Рисунок 2.44 – Временные диаграммы, иллюстрирующие метод преобразования фазового сдвига во временной интервал

Гармонические сигналы U_1 и U_2 преобразуются с помощью формирующих устройств в последовательность коротких импульсов U_3 и U_4 (рисунок 2.44), временное положение которых соответствует нуль-переходам входных сигналов из отрицательной области в положительную. Интервал времени Δt_x между ближайшими импульсами первой U_3 и второй U_4 последовательностей будет пропорционален измеряемому фазовому сдвигу φ_x :

$$\varphi_x = 360^\circ \frac{\Delta t_x}{T_x}, \quad (2.70)$$

где T_x – период сигнала;

Δt_x – интервал времени, пропорциональный измеряемому фазовому сдвигу.

Как видно из выражения (2.70), для измерения фазового сдвига φ_x рассматриваемым методом необходимо определить отношение $\Delta t_x/T_x$. Это отношение наиболее просто определяется как постоянная составляющая периодической последовательности прямоугольных импульсов U (рисунок 2.44) в соответствии с выражением

$$\bar{U} = U_m \frac{\Delta t_x}{T_x}. \quad (2.71)$$

Следовательно,

$$\varphi_x = 360^\circ \frac{\bar{U}}{U_m}. \quad (2.72)$$

Зафиксировав с помощью стабилизатора уровня амплитуду прямоугольных импульсов U_m на уровне, например, 360 мВ, и выделив с помощью фильтра низкой частоты постоянную составляющую периодической последовательности импульсов, получим, что измеренное среднее значение напряжения U (например, в мВ) будет пропорционально измеряемому фазовому сдвигу в градусах.

Рассмотренный цифровой фазометр, реализующий метод преобразования фазового сдвига во временной интервал, работает по следующему алгоритму преобразования: фазовый сдвиг – интервал времени – напряжение – цифровой код. Однако в настоящее время широко применяются цифровые фазометры, реализующие более простой алгоритм преобразования: фазовый сдвиг – интервал времени – цифровой код. Целесообразность применения такого алгоритма преобразования очевидна: упрощается алгоритм работы фазометра и, как следствие, появляется потенциальная возможность повышения точности измерения фазовых сдвигов.

2.8 Измерительные генераторы

При исследованиях, испытаниях и измерениях параметров или характеристик различных радиотехнических элементов, схем, устройств и систем требуются источники испытательных и реальных сигналов самых разнообразных форм, частот и мощностей (**генераторы сигналов**). Подавая эти сигналы на исследуемую аппаратуру, измеряют параметры электрических сигналов (частоту гармонического колебания, длительность и период следования импульсов, коэффициент модуляции и т.д.), снимают амплитудно-частотные и переходные характеристики электрических цепей, определяют коэффициент шума и чувствительность радиоприемных устройств, градуируют или тестируют измерительные приборы. Широкое применение наряду с

измерительными генераторами находят и **синтезаторы частоты**, вырабатывающие широкую сетку требуемых частот.

Измерительные генераторы (ИГ) — это экранированные источники электрических колебаний, мощность (напряжение) и степень модуляции которых могут быть фиксированными или регулируемыми в определенных пределах.

Они имеют ряд принципиальных отличий от обычных генераторов: обладают возможностью точной установки и регулировки выходных параметров колебаний (частоты, формы, длительности и уровня напряжения или мощности) в широких диапазонах; имеют высокую стабильность параметров и встроенные измерительные приборы, позволяющие контролировать установки и регулировки сигналов; могут работать совместно с другими средствами измерений.

Различают следующие виды измерительных генераторов: -

- **генераторы сигналов низкочастотные** – источники гармонических немодулированных или модулированных сигналов инфразвуковых частот (0,01.. 20 Гц), низкочастотных или звуковых и ультразвуковых частот (20.. 300 000 Гц);

- **генераторы сигналов высокочастотные** – источники гармонических немодулированных или модулированных сигналов высоких (0,3.. 300 МГц) и сверхвысоких частот (СВЧ, свыше 300 МГц);

- **генераторы качающейся частоты (свип-генераторы)** – источники гармонических сигналов, частота которых автоматически изменяется в пределах устанавливаемой полосы частот;

- **генераторы импульсов, или релаксационные генераторы** – источники одиночных или периодических видеопульсных сигналов различной формы;

- **генераторы шумовых и шумоподобных сигналов** – источники электрических шумовых и шумоподобных сигналов, выходное напряжение которых представляет собой реализацию случайного процесса с контролируемыми статистическими характеристиками.

Следует выделить среди них генераторы линейно изменяющихся напряжений (ГЛИН), которые относят к релаксационным генераторам. Их используют как в качестве измерительных, так и в качестве генераторов разверток.

В спектре выходного сигнала генератора гармонических колебаний имеется одна или несколько гармоник. Выходные колебания релаксационного генератора содержат множество гармоник с соизмеримыми амплитудами.

Для имитации реальных сигналов в измерительных генераторах предусмотрена возможность модуляции гармонических колебаний.

По виду модуляции генераторы подразделяются следующим образом:

- **генераторы с амплитудной (и амплитудной однополосной), частотной и фазовой синусоидальной модуляцией;**

- **генераторы с амплитудной, частотной и фазовой импульсной модуляцией;**

- **генераторы с импульсно-кодовой и шумоподобной модуляцией.**

Выходной уровень напряжения (мощности) измерительных генераторов может быть калиброванным или некалиброванным. Калиброванный уровень напряжения изменяется от сотых долей микровольт до десятых долей и единиц вольт, а мощности — от 10^{-15} Вт до единиц и десятков микроватт. Выходная мощность генераторов с некалиброванным уровнем может достигать нескольких ватт. Основными метрологическими характеристиками генераторов гармонических сигналов являются погрешности установки частоты и выходного уровня сигнала, нестабильность частоты, параметры выходного сигнала при модуляции, максимальная выходная мощность на согласованной нагрузке.

Генераторы импульсных сигналов формируют одиночные или парные импульсы, пачки и периодические последовательности прямоугольных импульсов с частотой повторения от долей герц до сотен мегагерц, длительностью от долей наносекунды до нескольких секунд и амплитудой от единиц милливольт до десятков вольт. Генераторы сигналов специальной формы создают треугольные и другие формы напряжения.

По назначению выделяют следующие группы ИГ:

- ИГ общего применения – источники стабильных сигналов заданной формы, параметры которых можно изменять в широких пределах (генераторы подгрупп Г3, Г4, Г5, Г6). Они должны сохранять заданную форму генерируемых сигналов во всем диапазоне частот, а также обеспечивать широкие пределы изменения амплитуды и частоты выходного сигнала, постоянство выходного напряжения (мощности) при изменении частоты, стабильность генерируемых частот, высокую точность установки частоты и уровня выходного напряжения (мощности, независимость параметров выходного сигнала от нагрузки и малый коэффициент нелинейных искажений);

- специальные ИГ (подгруппа Г1) – генераторы синусоидальных сигналов в диапазоне частот от десятков Гц до единиц ГГц, обеспечивающие выдачу напряжения (мощности) на стандартных нагрузках, с требуемыми показателями формы (или с заданным диапазоном качания). Они должны обеспечивать режим согласования со стандартными выходными сопротивлениями каналов, режим качания в стандартных для систем передачи полосах частот, широкий диапазон выходных уровней (от -80 дБ до +17,37 дБ), а также работать в составе автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры. В их состав входят высокостабильный кварцевый генератор, синтезатор частоты и устройство автоматического регулирования уровня выходного сигнала. Особую группу специальных генераторов составляют высокостабильные квантовые генераторы (водородные, рубидиевые, цезиевые), которые являются основой квантовых (атомных) стандартов частоты и времени (Ч1);

- синтезаторы частоты (Г7) – генераторы синусоидальных сигналов с дискретной перестройкой частоты и высокой стабильностью. Они позволяют получить сетку измерительных сигналов фиксированных частот с дискретностью в десятые и сотые доли герц;

- генераторы испытательных импульсов (Г9) формируют калиброванные импульсные сигналы для проверки переходных характеристик

четырёхполюсников и осциллографов, для исследования и поверки широкополосных радиоэлектронных устройств общего и специального назначения, для поверки и калибровки электронных осциллографов;

- генераторы цифровых сигналов (подгруппа Т) формируют импульсные двухуровневые сигналы, обладающие свойствами числовых последовательностей и предназначенные для испытания логических радиоэлектронных устройств и систем связи.

Обобщенная структурная схема ИГ представлена на рисунке 2.45.



Рисунок 2.45 – Обобщенная структурная схема измерительного генератора

В качестве первичного источника колебаний служит **задающий генератор**. Он определяет погрешность установки и стабильность частоты, диапазон рабочих частот, плавную расстройку частоты. Это может быть генератор синусоидальных колебаний, периодической последовательности импульсов или генератор шума.

Функции **преобразователя** определяются видом ИГ. Им может быть усилитель напряжения или мощности, модулятор, формирующее устройство, придающее сигналу определенную форму, умножитель, делитель и преобразователь частоты (образующий сетку частот в синтезаторах) и т.д.

Выходное устройство позволяет регулировать уровень выходного сигнала ИГ и изменять его выходное сопротивление или полярность импульсов. Оно может содержать аттенюатор, согласующий трансформатор. Повторитель, симметрирующий каскад и т.д.

Измерительное устройство обеспечивает установку параметров генерируемых сигналов с нормированной погрешностью. Эти функции могут выполнять отсчетные устройства функциональных устройств ИГ (частотные шкалы задающих генераторов, шкалы ослаблений аттенюаторов) или встроенные приборы (вольтметры, ваттметры или осциллографические индикаторы).

В качестве примера можно рассмотреть структурную схему измерительного генератора гармонических колебаний.

Независимо от назначения, принципа действия и схемотехнического выполнения генератор любых перечисленных колебаний (кроме параметрических схем генерации) состоит из

- нелинейного усилителя,
- цепи положительной обратной связи и
- источника питания постоянного тока.

Форма и частота выходных колебаний определяются только параметрами самого генератора.

Генератор гармонических колебаний должен содержать в своем составе **узкополосную колебательную систему**. Принцип действия релаксационных генераторов основан на зарядно-разрядных или накопительно-поглощающих явлениях, протекающих в широкополосных энергоемких цепях положительной обратной связи.

Рассмотрим условия самовозбуждения генератора гармонических колебаний. Для возбуждения и генерации колебаний часть их мощности с выхода усилителя (точнее, с колебательной системы) подают на его вход по специально введенной цепи положительной обратной связи (ОС). Иначе говоря, подобное устройство «возбуждает само себя» и поэтому называется **генератором с самовозбуждением**.

Упрощенно механизм возникновения колебаний в генераторе можно представить следующим образом. При запуске в колебательной системе самопроизвольно возникают слабые свободные колебания, обусловленные включением источников питания, скачками токов и напряжений в усилительном приборе и т.д. Благодаря введению цепи положительной ОС часть энергии колебаний с выхода усилителя поступает на его вход. Из-за наличия узкополосной колебательной системы описанные процессы происходят на одной определенной частоте ω и резко затухают на других частотах.

Вначале, после включения питания генератора, усиление возникшего в колебательной системе сигнала происходит в линейном режиме, а затем, по мере роста амплитуды колебаний, существенную роль начинают играть нелинейные свойства усилительного элемента. В результате амплитуда выходных колебаний генератора достигает некоторого установившегося уровня и потом становится практически неизменной. Энергия, отбираемая от источника постоянного тока усилителем за один период колебаний, оказывается равной энергии, расходуемой за то же время в нагрузке. В этом случае говорят о **стационарном режиме работы генератора**.

Генератор гармонических колебаний можно представить обобщенной структурной схемой (рисунок 2.46), состоящей из нелинейного резонансного усилителя с комплексным коэффициентом усиления по напряжению $K = K(j\omega)$ и цепи положительной ОС с комплексным коэффициентом передачи $\beta = \beta(j\omega)$. В схеме этого генератора отмечены комплексные амплитуды следующих напряжений: входного — $U_{ВХ} = U_{ВХ}(j\omega)$; выходного — $U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}(j\omega)$ и обратной связи — $U_{ОС} = U_{ОС}(j\omega)$.

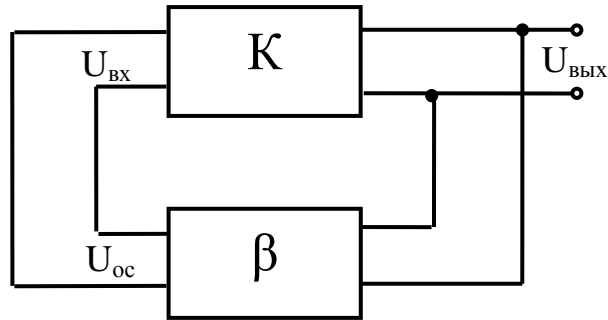


Рисунок 2.46 - Обобщенная структурная схема генератора гармонических колебаний

Напряжение обратной связи на любой частоте генерации ω

$$U_{oc} = U_{вх} = \beta U_{вых}. \quad (2.73)$$

Тогда выходное напряжение определяют как $U_{вух} = KU_{вх}$ или, с учетом формулы (2.73), $U_{вых} = K\beta U_{вых}$. Отсюда следует, что генератор будет работать в стационарном режиме при условии, когда

$$K\beta = 1. \quad (2.74)$$

Если $K\beta > 1$, то амплитуда выходных колебаний нарастает, что определяет необходимое условие самовозбуждения генератора.

В генераторах гармонических колебаний колебательными системами служат резонансные LC-контур (в СВЧ генераторах для этих целей используются резонаторные СВЧ устройства, или резонаторы) и частотно-зависимые (фазирующие) LC-цепи.

Генераторы гармонических колебаний с LC-контурами называют **LC-генераторами**, а с фазирующими RC-цепями — **RC-генераторами**. LC-генераторы вырабатывают колебания достаточно высокой частоты (более 100 кГц), а RC-генераторы — низкочастотные гармонические колебания (от долей герц до десятков килогерц).

Генераторы гармонических колебаний низкочастотных и высокочастотных диапазонов для средств измерений выполняются в двух видах: генераторы сигналов (ГС) — как правило низкочастотные генераторы, и генераторы стандартных сигналов (ГСС) — генераторы колебаний высоких частот. Генераторы стандартных сигналов имеют более высокую стабильности частоты и формы, но меньшие уровни выходного сигнала, чем ГС.

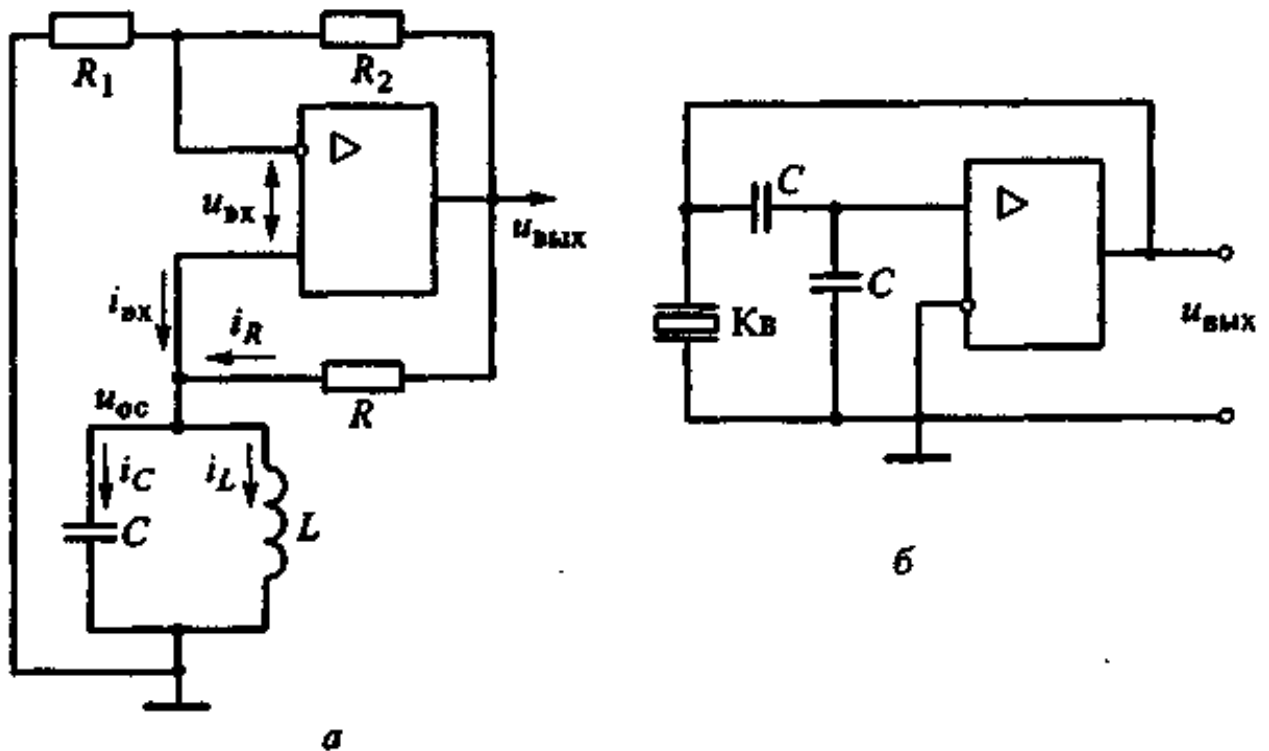
В **LC-генераторах гармонических колебаний** частота в основном определяется условием резонанса колебательного контура:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.75)$$

Упрощенная схема LC-генератора на операционном усилителе представлена на рисунке 2.47,а. Усилитель генератора охвачен двумя цепями ОС, обеспечивающими режимы балансов амплитуд и фаз. Баланс амплитуд устанавливают цепью отрицательной ОС, состоящей из резисторов R_1 и R_2 . С ее помощью задают требуемый коэффициент усиления собственно усилителя $|K| = \frac{R_2}{R_1}$. Баланс фаз обеспечивает цепь положительной ОС, состоящей из резистора R и параллельного колебательного LC-контура. Коэффициент передачи цепи положительной ОС

$$\beta = \frac{R_0}{R_0 + R}, \quad (2.76)$$

где R_0 — резонансное сопротивление параллельного контура.



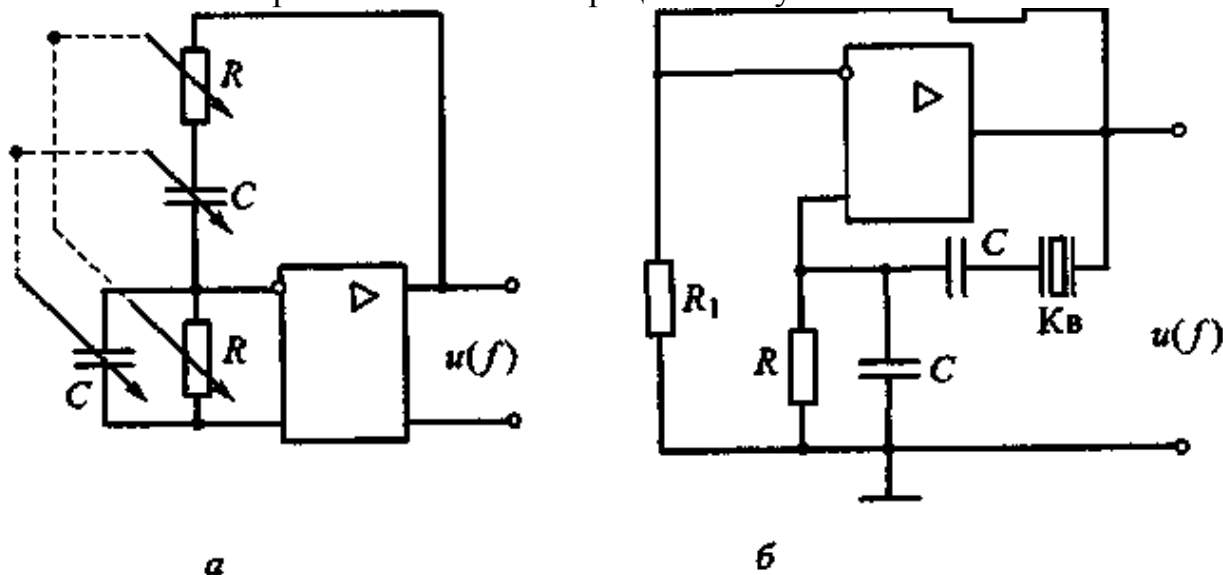
а — упрощенная электрическая;
б — с кварцевой стабилизацией.

Рисунок 2.47 – Схемы LC-генераторов на операционных усилителях

Диапазон перестройки генерируемой частоты измерительных LC-генераторов обычно лежит в пределах от 0,01 Гц до единиц мегагерц, минимальная дискретность ее установки составляет 0,01 Гц.

Технические характеристики LC-генераторов в диапазонах низких частот существенно ухудшаются из-за резкого возрастания величин индуктивностей и емкостей колебательных контуров и соответствующих им размеров катушек и конденсаторов. Их также трудно перестраивать по частоте в широких пределах. Поэтому в низкочастотных измерительных генераторах гармонических колебаний в качестве колебательных систем и цепей положительной ОС применяют частотно-избирательные RC-цепи. Такие источники колебаний называются RC-генераторами.

В схеме RC-генератора, как и в любом другом генераторе, необходимо ввести положительную ОС. Это достигается включением фазосдвигающих RC-цепей. Обычно в RC-генераторе включают мост Вина (рисунок 2.48,а), который осуществляет сдвиг фазы сигнала ОС на 180° . Подобный генератор строится на основе усилителя, у которого в широком диапазоне частот коэффициент передачи – вещественная величина, а фазовый сдвиг $\varphi = 2\pi$ обеспечивают мостом Вина и инверсией сигнала в операционном усилителе.



а – обычная;
б – с кварцевой стабилизацией

Рисунок 2.48 - Схемы RC-генераторов с мостом Вина

2.9 Принципы автоматизации измерений

При проведении научных исследований, разработке, производстве и эксплуатации современного радиоэлектронного оборудования возникает необходимость перерабатывать большие объемы измерительной информации за ограниченное время. Следствием этого является потребность в создании автоматизированных СИ, которые позволяли бы автоматизировать процессы измерений, обработки и регистрации их результатов при одновременном исключении из результатов измерений субъективных погрешностей.

В общем смысле под **автоматизацией** понимают применение технических средств, экономико-математических методов и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи и использования энергии, мате-

риалов или информации.

Первым и наиболее очевидным **направлением** в области автоматизации измерений является разработка СИ, в которых все необходимые процедуры настройки и регулировки выполняются автоматически. Автоматическая настройка СИ (выставление пределов измерений, калибровка) достигается, например, преобразованием измеряемой величины к виду, позволяющему воздействовать на последующие элементы схемы прибора; автоматическим изменением в требуемых пределах величины, воспроизводимой мерой, входящей в состав прибора; сравнением измеряемой величины с величиной, воспроизводимой мерой. Характерным примером такого СИ является осциллограф с автоматизированным управлением.

Вторым направлением является разработка измерительных приборов с непосредственным отсчетом, в которых реализована замена косвенных измерений прямыми. Микропроцессоры, применяемые в приборах такого типа, позволяют автоматизировать все необходимые вычислительные процедуры. Кроме того, в ряде случаев оказывается возможным за счет схемотехнических решений проектировать измерительные приборы, которые могут прямо измерять искомые величины, трансформируя косвенные измерения в прямые (например, измеритель отношения напряжений).

В качестве **третьего направления** можно отметить создание многофункциональных (комбинированных) измерительных приборов, выполняющих целый ряд функций и позволяющих измерять несколько физических величин. Примерами многофункциональных приборов являются, например, универсальные цифровые вольтметры и мультиметры, позволяющие измерять силу и напряжение постоянного и переменного токов, а также сопротивление. К третьему направлению автоматизации измерений относится и разработка панорамных измерительных приборов, в которых автоматизирован процесс измерения при исследовании зависимостей параметров сигналов или цепей от какого-либо аргумента (анализ спектра сигналов, исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик радиотехнических цепей и устройств). С помощью панорамных приборов обеспечивается визуальное наблюдение зависимости определяемой характеристики от выбранного аргумента (чаще всего частоты) на экране осциллографического индикатора.

Измерительные приборы четвертого поколения - приборы с искусственным интеллектом - создаются на основе микропроцессоров и определяют **четвертое направление** в области автоматизации измерений.

Микропроцессорное СИ содержит встроенный микропроцессор, запрограммированный на выполнение определенных измерительных функций:

- автоматической установки пределов измерения,
- корректировки аддитивных и мультипликативных погрешностей;
- автоматического управления процессом уравнивания в приборах сравнения;
- первичной обработки данных;
- статистической обработки данных;

- обработки данных при определении контролируемых параметров по измеренным значениям и известным зависимостям, при учете нелинейности характеристик элементов, влияния параметров окружающей среды, а также сглаживания и аппроксимации полученных зависимостей;

- обработки данных по алгоритмам, реализующим метод измерения;
- регистрации данных в буферных регистраторах;
- визуализации и регистрации данных на осциллографах и дисплеях;
- диагностики функциональных узлов приборов;
- управления работой узлов, выполняющих отдельные функции измерительного преобразования;
- полного управления процессом измерения по заданной программе.

В приборах, входящих в измерительную систему, микропроцессоры используются также для связи приборов в единый комплекс, кодирования и декодирования данных, передаваемых по каналам связи, повышения надежности системы путем защиты данных от искажений, сжатия данных и других задач, характерных для информационно-измерительных систем.

Пятым направлением считают разработку измерительно-вычислительных комплексов (ИВК), в состав которых входят измерительные и вспомогательные устройства, управляемые от процессора, необходимые периферийные устройства и программное обеспечение.

В качестве **шестого** и самого, пожалуй, актуального **направления** автоматизации измерений можно считать создание информационно-измерительных систем (ИИС).

Основную тенденцию в дальнейшем развитии СИ электрических величин составляют приборы четвертого, пятого и шестого направлений.

Типовая схема автоматизированного измерительного эксперимента изображена на рисунке 2.49.

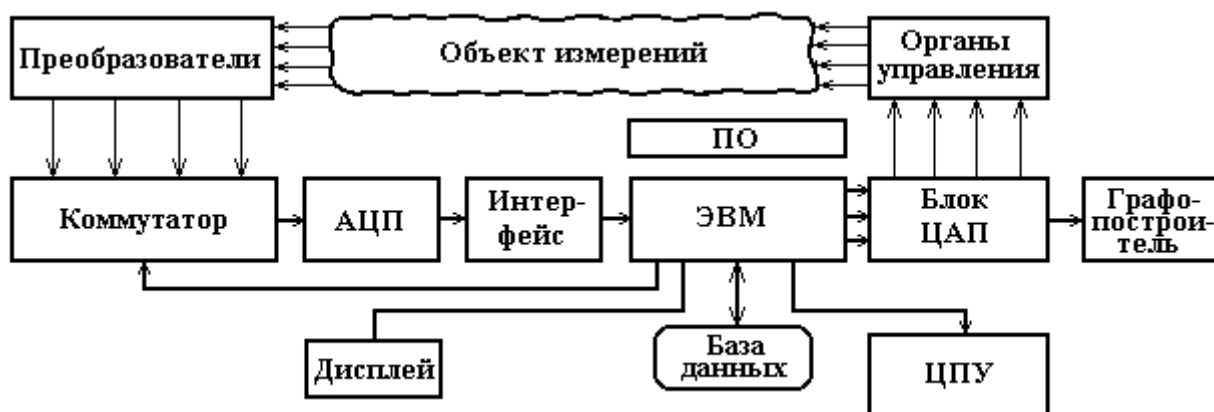


Рисунок 2.49 – Типовая схема автоматизированных измерений

Измеряемые ФВ, характеризующие объект измерений, поступают на преобразователи, а затем коммутируются с целью повышения эффективности

использования схемы измерений при многоканальных измерениях. При этом опрос преобразователей можно организовать циклическим, если измеряемые параметры однородны и стационарны; программным, если сигналы стационарны, но неоднородны по спектру; адаптивным, если сигналы нестационарны.

Электрический сигнал с выбранного коммутатором преобразователя преобразуются в цифровой код в аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Сопряжение измерительного канала с ЭВМ обеспечивает интерфейс. Далее измерительная информация подвергается обработке по заданной программе в ЭВМ и представляется в удобной форме на экране дисплея. База данных предназначена для хранения необходимой измерительной и справочной информации.

Если требуется представление результатов измерений в аналоговой форме, применяются цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Воздействие на объект измерения осуществляется с помощью органов управления.

В автоматизированных измерениях последовательность действий и в целом логика эксперимента формализуются в программном обеспечении; кроме того, наличие ЭВМ позволяет спланировать и провести дополнительно еще и вычислительный эксперимент.

Одним из средств сопряжения измерительной аппаратуры с ЭВМ является приборный интерфейс. **Блок-схема ИИС, организованной на приборном интерфейсе**, изображена на рисунке 2.50. Подобные системы принято называть измерительно-вычислительными комплексами (ИВК).

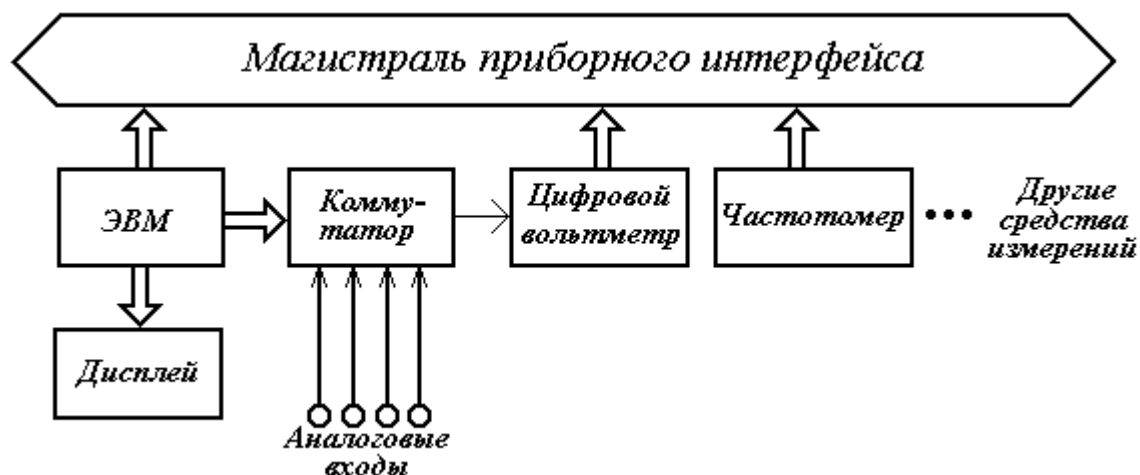


Рисунок 2.50 – Измерительная система с применением приборного интерфейса

Средством, объединяющим измерительные, вычислительные управляющие устройства на собственной шине микроЭВМ, является компьютерно-измерительная система (КИС). **Обобщенная структурная схема КИС** представлена на рисунке 2.51.

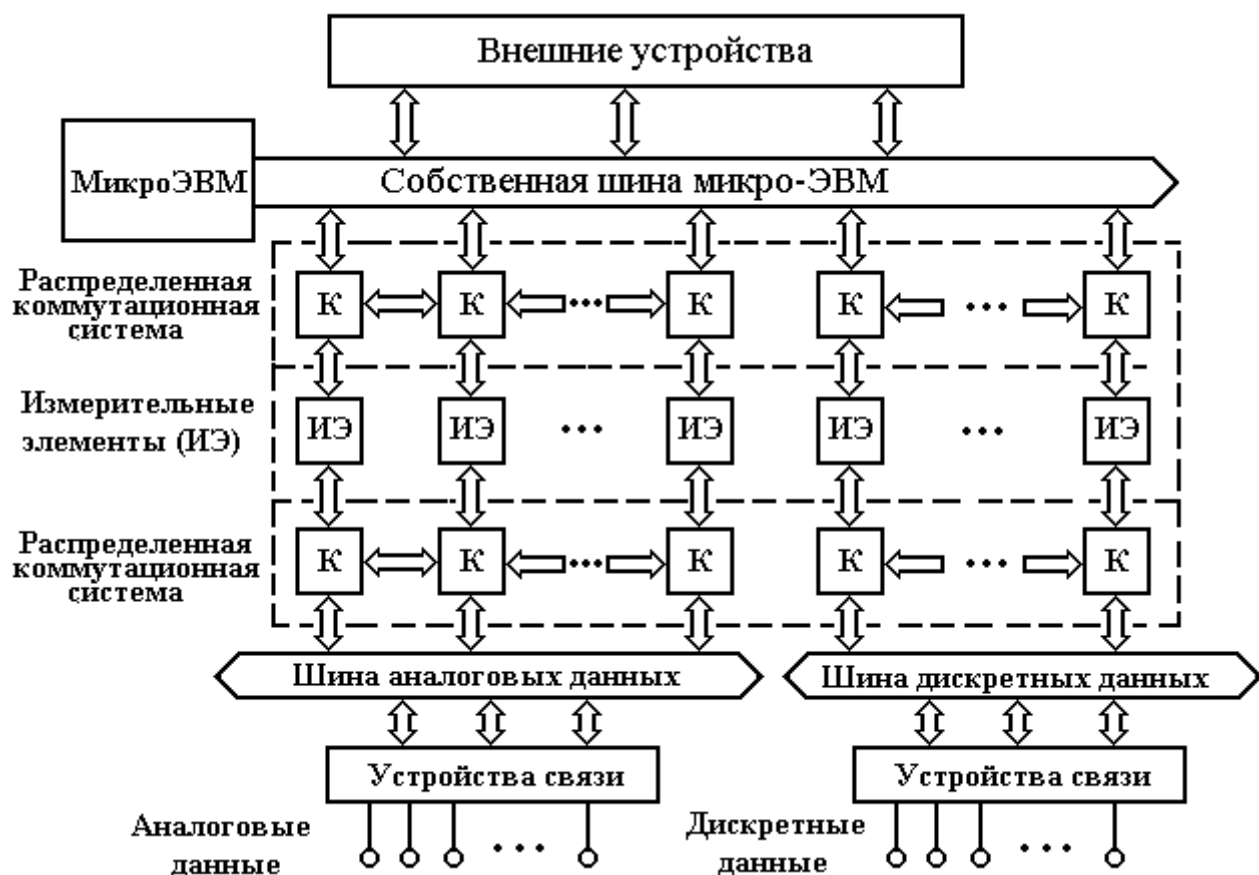


Рисунок 2.51 – Обобщенная структурная схема компьютерно-измерительной системы

Программное обеспечение КИС можно условно разделить на три уровня: аттестованные программы, прошедшие метрологическую аттестацию и допущенные к использованию с соответствующими КИС; программы, сшитые из модулей библиотечных программ, и самостоятельные программы пользователей.