

2.1 ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1.1 Назначение и виды осциллографов

Электронно-лучевой осциллограф (ЭЛО) представляет собой многофункциональный прибор (мультиметр) для визуального исследования и измерения параметров электрических сигналов и электрических цепей. С помощью ЭЛО можно измерять амплитуду, частоту, фазовый сдвиг, период, мощность сигналов произвольной формы, модуль, активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления.

Все многообразие современных осциллографов можно подразделить на следующие основные типы:

– **универсальные** осциллографы, предназначенные для измерения токов и напряжений в широком диапазоне частот (от 0 до сотен мегагерц) и амплитуд (от 100 микровольт до нескольких сотен вольт). Широкий частотный диапазон ЭЛО позволяет проводить приближенные измерения параметров в области радиочастот, в которой цифровые методы не всегда эффективны

Основным элементом ЭЛО является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) либо с электростатическим, либо с электромагнитным управлением пространственным положением электронного луча (рис.1). Тонкий электронный луч формируется из пучка электронов, испускаемых подогреваемым катодом 7, при последовательном прохождении фокусирующего и ускоряющего анодов 4,5 и диафрагмы 3. Модулирующий электрод 6 предназначен для модуляции внешним сигналом яркости луча.

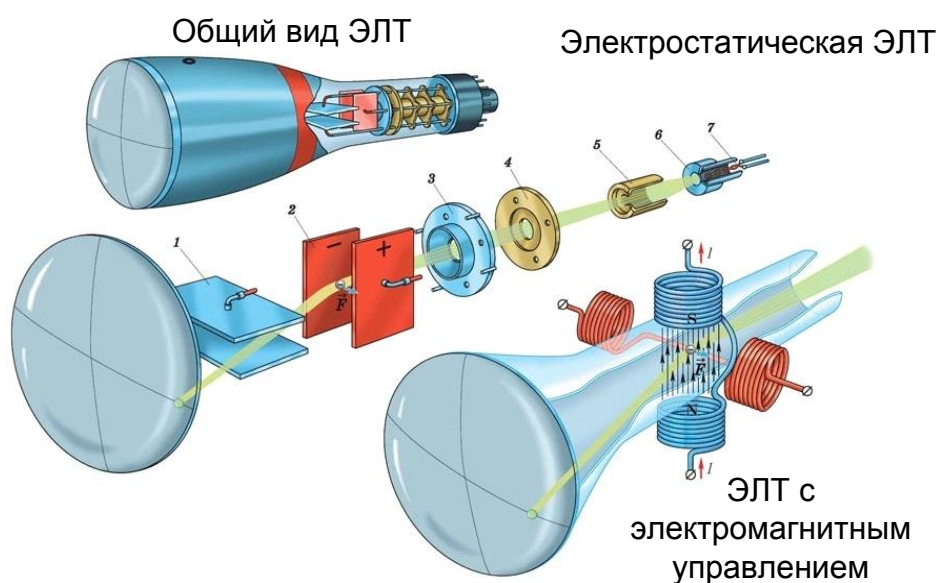


Рис.1 Конструкции электронно-лучевых трубок: 1- вертикальные отклоняющие пластины, 2- горизонтальные отклоняющие пластины, 3 - диафрагма, 4- ускоряющий анод, 5 - фокусирующий анод, 6 - модулятор (сетка), 7 - подогреваемый катод

Внутренняя поверхность дна баллона (экран Э) покрыта люминофором, способным светиться под действием бомбардировки электронами.

Типовая структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа приведена на рис.2

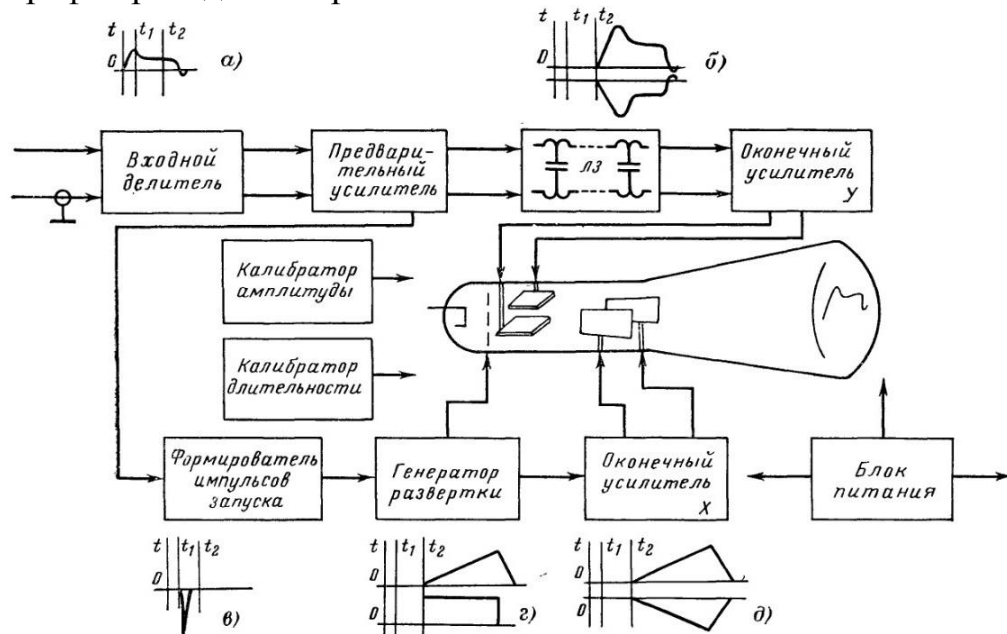


Рис.2 Типовая структурная схема электронно-лучевого осциллографа

Обычно область линейного усиления предварительного усилителя не превышает нескольких милливольт. Превышение амплитуды входного сигнала области линейного усиления может привести к нелинейному искажению осциллограммы и значительным погрешностям измерения. Поэтому для обеспечения работы предварительного усилителя в линейной области амплитудной характеристики $U_{ВЫХ}(U_{ВХ})$ измеряемый сигнал вначале поступает на входной делитель напряжения, который устанавливает необходимый коэффициент вертикального отклонения, $\frac{B}{дел}$. Предварительный усилитель

предназначен для линейного усиления измеряемого сигнала до уровня, необходимого для отклонения луча на весь экран (150-200 В). Усиленный сигнал U_y поступает на вертикально отклоняющие пластины. Отклонение луча по вертикальной оси пропорционально измеряемому сигналу $y = S_y U_y$, где $S_y, \left[\frac{мм}{В} \right]$ - чувствительность электронно-лучевой трубки по вертикальной оси y

Сигнал, поступающий на вертикально отклоняющие пластины, задерживается линией задержки для того, чтобы движения луча по горизонтальной оси началось несколько раньше, чем входной сигнал поступит на вертикальные пластины. Это улучшает условия наблюдения коротких одиночных импульсных сигналов.

Выходной сигнал предварительного усилителя используется для

формирования импульсов запуска генератора развертывающего напряжения. Генератор развертки формирует треугольные импульсы U_P , которые после усиления в оконечном усилителе поступают на горизонтально отклоняющие пластины. Использование линейно изменяющегося напряжения обеспечивает перемещение луча по горизонтальной оси с постоянной скоростью т.к. $\frac{\partial U_P}{\partial t} = const$. Отклонение луча по горизонтальной оси $x = S_x U_P$, где $S_x, \left[\frac{мм}{В} \right]$ -

чувствительность электронно-лучевой трубки по вертикальной оси x . Таким образом на электронный луч, формируемый в ЭЛТ, одновременно воздействуют два отклоняющих напряжения по вертикальной и горизонтальной осям. В результате на экране формируется осциллограмма измеряемого сигнала. Принцип формирования осциллограммы синусоидального сигнала в дискретных точках времени поясняется на рис.3.

Изображение измеряемого сигнала на экране неподвижно в том случае, когда частота развертки равна или кратна частоте измеряемого напряжения. Неподвижность изображения обеспечивается за счет регулировки частоты и уровня запуска генератора развертки.

Осциллограф может работать в режимах открытого или закрытого входов. В первом случае на вход поступает как постоянная, так и переменная составляющие сигнала. Во втором случае входной сигнал поступает на вход через разделительный конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую.

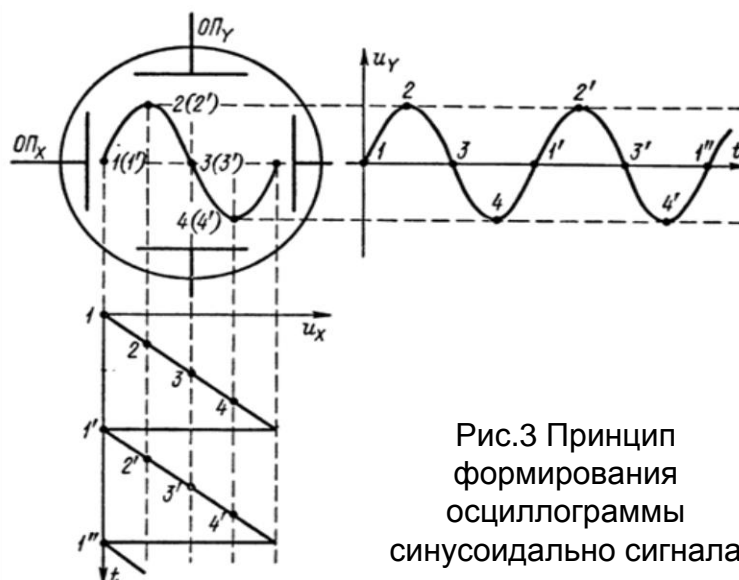


Рис.3 Принцип формирования осциллограммы синусоидального сигнала

Для проверки правильности масштабов по вертикальной и горизонтальной осям в осциллографе предусмотрены калибраторы амплитуды и длительности. С их помощью на вход подается последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда и частота которой известна с высокой точностью. С помощью регулировки частоты развертки (потенциометр «корр. развертки») и коэффициента усиления (потенциометр «корр. усиления») добиваются того,

чтобы калиброванный сигнал занимал строго определенное число делений по вертикали и горизонтали. Калибровка позволяет уменьшить мультипликативные погрешности измерения амплитуды и частоты до уровня, указанного в паспорте прибора.

Основные метрологические характеристики универсальных осциллографов:

- коэффициент отклонения S_u – отношение напряжения входного сигнала к отклонению луча (в делениях шкалы), вызванному этим напряжением. Типовой диапазон значений 50 мкВ/дел – 10 В/дел.

- коэффициент развертки D_p - отношение времени Δt к отклонению луча, вызванному напряжением развертки за это время. Типовой диапазон значений 0,01 мкс/дел – 1 с/дел.

- полоса пропускания – диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения изменяется не более чем на 3 дБ относительно значения на средней частоте. Современные осциллографы имеют полосу пропускания 100 МГц.

- классы точности осциллографов - 1, 2, 3 или 4

- параметры входов осциллографов определяется активным сопротивлением $R_{вх}$ (>1 Мом) и входной емкостью $C_{вх}$ (единицы пикофарад).

В двухлучевых ЭЛО применяются трубки с двумя электронными пушками и двумя независимыми каналами управления лучом по осям X и Y . В двухканальных осциллографах применяется обычная однолучевая трубка и один быстродействующий электронный коммутатор, поочередно подключающий измеряемые сигналы к одним и тем же отклоняющим пластинам Y . Узел горизонтального отклонения является общим для обоих каналов измерения. Существуют многоканальные ЭЛО, у которых число измеряемых каналов может достигать 20. Применение таких осциллографов позволяет контролировать взаимное временное положение фронтов сигналов в на множестве контрольных точек в сложных цифровых схемах.

Запоминающие осциллографы, позволяют запомнить изображение сигнала на время, необходимое для его регистрации. В аналоговых осциллографах запоминание изображения сигнала достигается за счет использования в ЭЛТ люминофоров с большим временем послесвечения, которое может достигать нескольких десятков секунд.

-Стробоскопические осциллографы - предназначены для измерения наносекундных импульсов и СВЧ – процессов. Принцип их действия основан на редукции масштаба времени за счет умножения измеряемого сигнала на последовательность коротких стробирующих импульсов, период которых отличается от периода исследуемого сигнала на величину $\Delta\tau$. В результате формируются выборки значений измеряемого сигнала, сдвинутые по временной оси на величину $T = mT_c + \Delta\tau$, где $m=1,2,3...$, T_c -период сигнала (рис.4). Огибающая этих выборок, повторяющая форму исследуемого сигнала, оказывается многократно растянутой по оси времени, что улучшает условия осциллографирования быстропеременных сигналов.

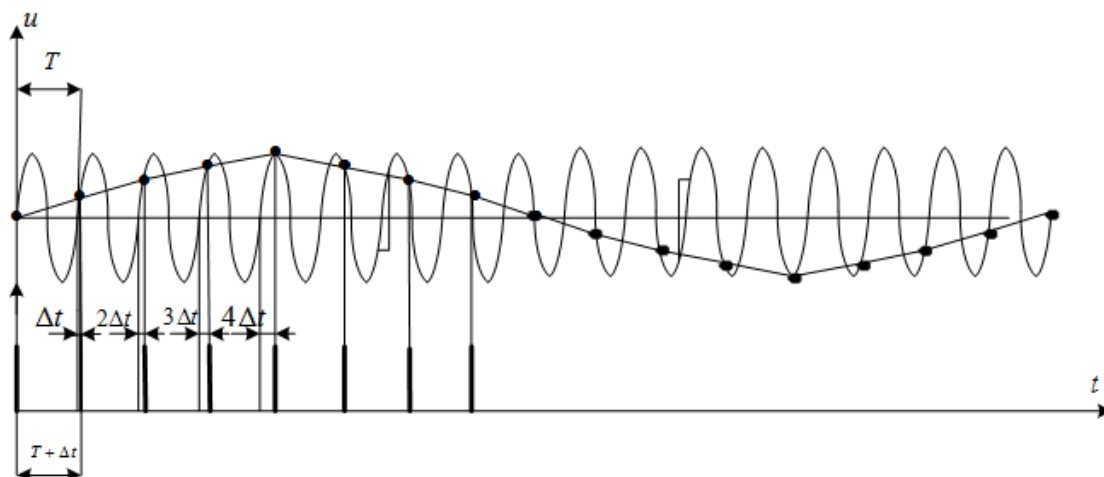


Рис.4 Временные диаграммы работы стробоскопического ЭЛО

Микропроцессорные осциллографы - содержат встроенное микропроцессорное устройство, позволяющее расширить функциональные возможности приборов за счет реализации алгоритмов статистической обработки, сложения, умножения, цифровой фильтрации измеряемых сигналов сигнала, автоматизации операций калибровки, балансировки и др.

Цифровые осциллографы (ЦО). Внешний вид осциллографа компании Good Will Instrument Co. Ltd. с цветным жидкокристаллическим экраном представлены ниже (рис. 5).



Рис.5 Внешний вид осциллографа компании Good Will Instrument.

На рис. 6. в предельно упрощенном виде показана структурная схема цифрового осциллографа (ЦО).

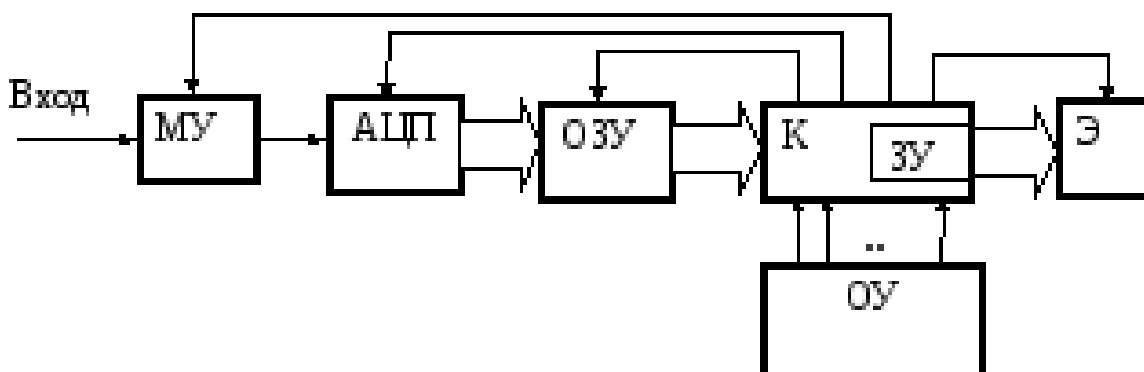


Рис. 6 Упрощенная__схема цифрового осциллографа: МУ – масштабирующее устройство (усилитель и делитель напряжения); АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; МК – микроконтроллер, ЗУ – запоминающее устройство; Э – экран; ОУ – органы управления (кнопки, ручки).

Принцип действия ЦО. Пройдя через МУ, входное напряжение $u(t)$ преобразуется АЦП в дискретную последовательность кодовых слов N_i , отображающих мгновенные значения u_i этого напряжения. Каждое новое кодовое слово записывается в ОЗУ. При этом все предыдущие записанные отсчёты сдвигаются на одну ячейку в регистре сдвига, а самый первый отсчет N_1 исчезает, как бы «выталкивается» из регистра. Если ОЗУ состоит из M ячеек, то в нём, постоянно обновляясь, содержится M последних, «свежих», кодовых слов. Разрядность ячеек должна соответствовать разрядности АЦП. Так продолжается до тех пор, пока не будет выполнено некое заданное условие, например, когда какое-либо u_i впервые превысит заданный оператором уровень («запуск по уровню»). После этого содержимое некоторого количества ячеек ОЗУ переписывается в запоминающее устройство ЗУ, входящее в состав микроконтроллера МК.

Наиболее технологически сложным элементом ЦО является экран, обеспечивающий индивидуальное управление каждым пикселем формируемого изображения сигнала. Каждой ячейке ЗУ соответствует точка на экране, по цвету отличающаяся от фона. Её абсциссу определяет номер ячейки, а ординату кодовое слово N_i , находящееся в этой ячейке. При последовательном считывании информации, записанной в ячейках на экране формируется изображение измеряемого сигнала.

Для хорошего изображения сигнала на экране вполне достаточно 2 точки на 1 мм. Средних размеров экран имеет высоту 100 мм и ширину 120 мм. Следовательно, на экране должны располагаться $200 \times 240 = 48\,000$ точек или более.

Таким образом, для формирования хорошего изображения АЦП должен иметь не менее 8 двоичных разрядов (256 точек по вертикали) и ЗУ должно содержать 256 восьмиразрядных ячеек.

- **виртуальные осциллографы** - приборы, содержащие современный

быстродействующий персональный компьютер (ПК), устройство сбора данных (например, АЦП), подключенное к параллельному порту ПК, и соответствующее программное обеспечение. В результате оцифровки исследуемого процесса в ОЗУ ПК формируется числовой массив, который после обработки выводится в виде осциллограммы на виртуальную переднюю панель осциллографа, которая эмулируется программной частью прибора.

2.1.2 Техника осциллографических измерений

Общее устройство, принцип действия, а также правила выбора ЭЛО для решения конкретных измерительных задач приведены в методических указаниях к лабораторному практикуму по метрологии и радиоизмерениям [16, 17], и поэтому здесь опущены.

Перед измерениями необходимо убедиться, что прибор подходит для выполнения данной измерительной задачи по полосе частот и амплитудному диапазону. Если в приборе не предусмотрено автоматическое выполнение калибровки и балансировки, то перед измерением его следует откалибровать и сбалансировать вручную в соответствии с методиками, приведенными в инструкции по эксплуатации. Это позволит уменьшить аддитивную и мультипликативную погрешности измерения до значений, приведенных в паспортных данных прибора. Неоткалиброванный и несбалансированный ЭЛО, строго говоря, не является средством измерений, т.к. его погрешность в этом случае неизвестна и она может значительно отличаться от паспортных характеристик точности измерений.

Рассмотрим, как с помощью осциллографа можно выполнять измерения основных радиотехнических величин.

Измерение постоянной составляющей сигнала. Для этого сигнал подают сначала на открытый вход ЭЛО, а затем - на закрытый. После этого с помощью масштабной сетки, нанесенной на экран прибора, подсчитывают число делений шкалы h , на которое сместился сигнал вверх или вниз.

Постоянная составляющая сигнала вычисляется по формуле:

$$u_{\text{ср}} = C_y \cdot h \cdot K_{\text{д}}, \quad (2.1.1)$$

где C_y - коэффициент вертикального отклонения $\left[C_y \right] = \left[\frac{B}{\text{дел.}} \right]$, $K_{\text{д}}$ - коэффициент выносного делителя, если таковой используется.

Погрешность этого метода составляет $5 \div 10 \%$.

Пример (см. рис.7).

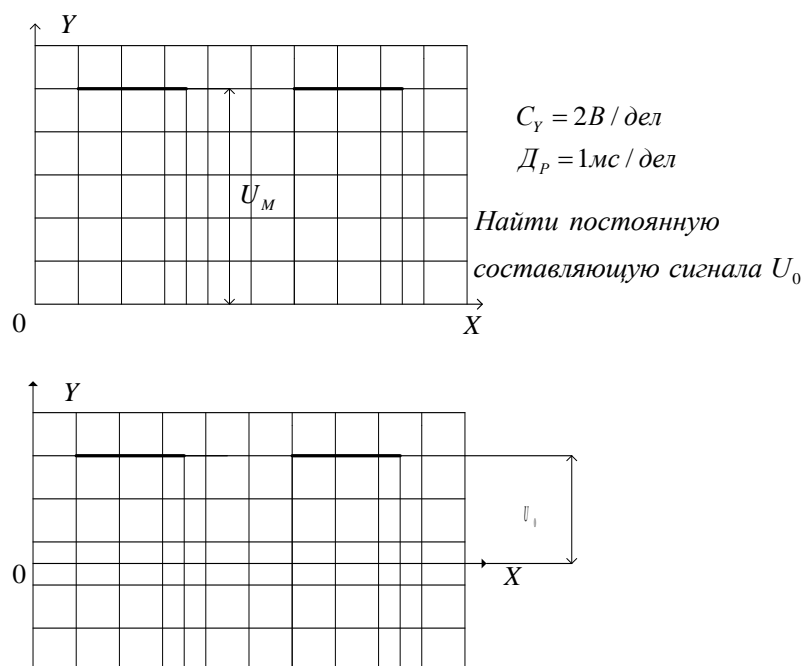


Рис.7 Осциллограммы к примеру

Измерение амплитудных значений тока и напряжения. Для измерения напряжения используются следующие методы:

- *метод калиброванной шкалы*, основанный на использовании предварительно откалиброванного аттенюатора канала вертикального отклонения (ВО).

Значение измеряемой амплитуды напряжения вычисляется по той же формуле, что и постоянная составляющая (2.1), в которой h - число делений, соответствующее амплитуде измеряемого напряжения. Погрешность этого метода составляет $5 \div 10 \%$.

- *метод сравнения*, основанный на поочередной подаче на вход Y измеряемого u_x и калиброванного u_k сигналов и измерении соответствующих отклонений луча в делениях шкалы осциллографа m и n . Учитывая, что функция преобразования канала ВО линейна (рис. 8), результаты измерений можно представить в виде пропорции: в делениях шкалы осциллографа m и n .

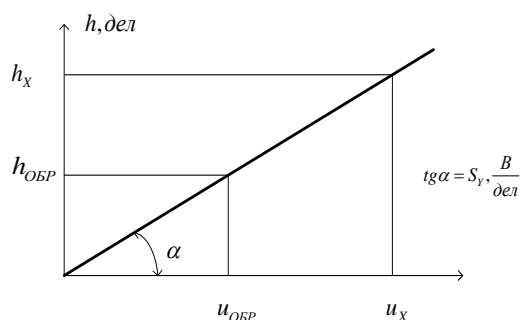


Рис.8 Функция преобразования канала вертикального отклонения

Учитывая, что функция преобразования канала ВО линейна, результаты измерений можно представить в виде пропорции:

$$\left. \begin{array}{l} u_x - m \\ u_{OБP} - n \end{array} \right\},$$

откуда
$$u_x = u_{OБP} \frac{m}{n}.$$

За счет использования образцового напряжения погрешность метода может быть уменьшена до $3 \div 5 \%$.

- *нулевой метод* реализуется на базе осциллографов, которые снабжены дифференциальным услителем канала ВО, входы которого выведены на переднюю панель прибора. При отсутствии в составе ЭЛО встроенного усилителя в схеме может быть использован внешний измерительный усилитель. На входы усилителя подаются измеряемое напряжение U_x и образцовое напряжение $u_{обр}$ от регулируемого источника (рис.2.1). На выходе усилителя действует усиленная разность измеряемого и образцового сигналов, которая подается на нуль-индикатор. В качестве нуль-индикатора (НИ) используется сам осциллограф, переведенный в режим максимальной чувствительности. Регулировкой $U_{обр}$ добиваются равенства нулю выходного сигнала усилителя $U_{вых} = 0$. При этом $U_x = U_{обр}$ и результат измерения считывается со шкалы источника образцового напряжения.

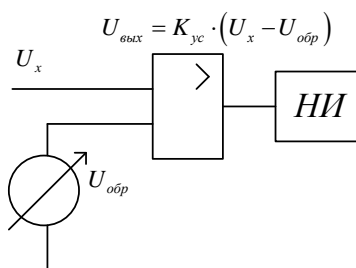


Рис.9. Измерение напряжения нулевым методом

Погрешность метода составляет 1% и менее. Доминирующими факторами, определяющими погрешность измерения, являются: погрешность градуировки шкалы $U_{обр}$, дрейф напряжения смещения дифференциального усилителя, «ненулевой» порог чувствительности осциллографа.

Измерение тока производится косвенно, по падению напряжения на образцовом сопротивлении известного значения. Измерение тока производится косвенно по падению напряжения на сопротивлении известного значения (рис.10).

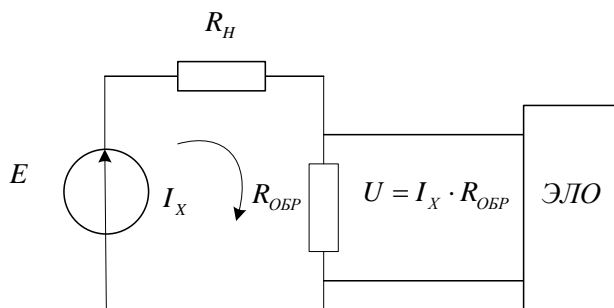


Рис. 10 Схема измерения тока с помощью ЭЛО

Образцовое сопротивление выбирают таким, чтобы оно практически не искажало ток в измеряемой цепи $R_{ОБР} \ll R_H$. В частном случае при $R_{ОБР} = 1 \text{ Ом}$ напряжение на входе ЭЛО будет численно равно измеряемому току $U = I_X$.

Измерение временных интервалов с помощью осциллографа. Для измерения временных интервалов и периода сигналов произвольной формы используются следующие методы:

- *метод калиброванной шкалы* - основан на использовании предварительно откалиброванной развертки канала горизонтального отклонения (ГО). Значение измеряемого временного интервала вычисляется по формуле:

$$T_x = h_x D_p M ,$$

где h_x - число делений по горизонтальной оси, соответствующее измеряемому временному интервалу, D_p - коэффициент развертки, M - множитель развертки. Погрешность этого метода составляет $5 \div 10\%$.

метод сравнения - основан на подсчете числа периодов маркерных меток, соответствующего измеряемому временному интервалу (рис.11). Для получения маркерных (яркостных) меток на изображении исследуемого сигнала на вход «Z» подается переменное напряжение, например, меандр образцовой частоты f_0 .

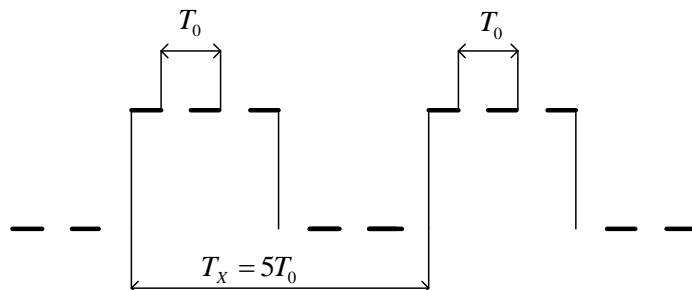


Рис 11. Измерение временных интервалов по методу сравнения

Зная период сигнала образцовой частоты $T_0 = f_0^{-1}$ и число периодов n маркерных меток, укладывающихся на измеряемом интервале, можно определить $T_x = nT_0$. Для уменьшения субъективной погрешности измерения образцовую

частоту регулируют так, чтобы на измеряемом временном интервале укладывалось целое число меток.

За счет использования сигнала образцовой частоты погрешность метода может быть уменьшена до $3 \div 5\%$.

Частота электрических колебаний может быть измерена следующими методами:

- косвенно, по результату измерения периода сигнала T_x одним из рассмотренных выше способов: $f_x = \frac{1}{T_x}$;

Измерение частоты в режиме круговой развертки. В этом случае напряжение, частоту которого f_x необходимо измерить, подается на фазорасщепляющую RC- цепь (рис.12).

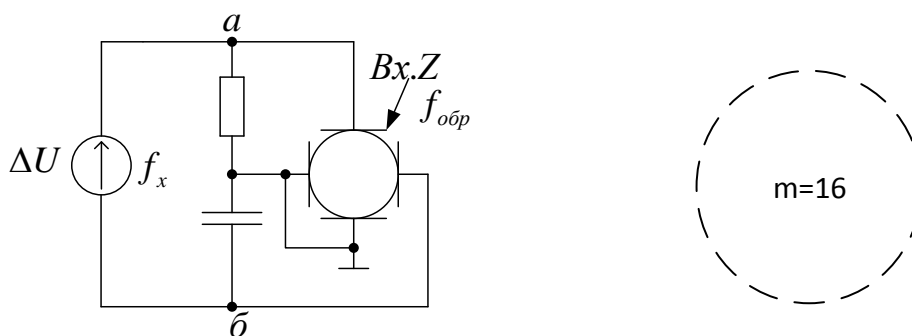


Рис. 12. Измерение частоты в режиме круговой развертки

Поскольку фазы напряжений на емкости и активном сопротивлении сдвинуты на 90° , то на экране устанавливается окружность ($\varphi_{ab} = 90^\circ$). Сигнал более высокой образцовой частоты подается на вход “Z”, т.е. электрод, модулирующий яркость изображения. По числу маркерных меток m можно установить соотношение между измеряемой и образцовой частотой $f_x = m \cdot f_{обр}$. Для повышения точности измерений образцовую частоту необходимо подстроить так, чтобы на окружности укладывалось целое число периодов маркерных меток.

Пример: по осциллограмме на рис 13. найти параметры сигнала U_M , t_H , T_x , f_x

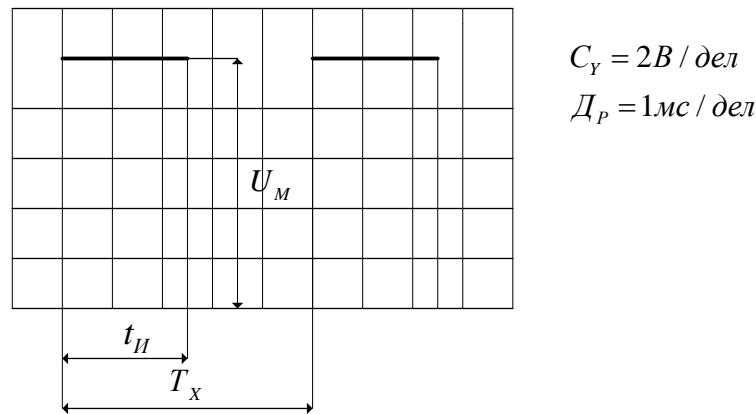


Рис.13. Осциллограмма измеряемого сигнала

Ответ: $U_M = 10B$, $t_H = 2 \text{ мс}$, $T_X = 5 \text{ мс}$, $f_X = 20 \text{ Гц}$.

Измерение фазового сдвига с помощью ЭЛО. Осциллографические методы приближенной оценки фазового сдвига в области высоких частот. в которой Для измерения применяются различные методы, среди которых наибольшее распространение получили метод двухлучевого осциллографа, метод фигур Лиссажу и компенсационный метод.

Метод двухлучевого осциллографа. В этом случае на входы X и Y_2 осциллографа подаются исследуемые сигналы U_1 и U_2 (рис.14)

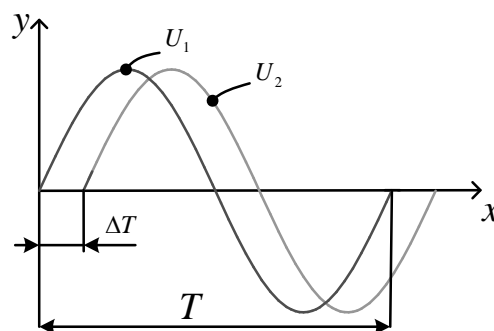
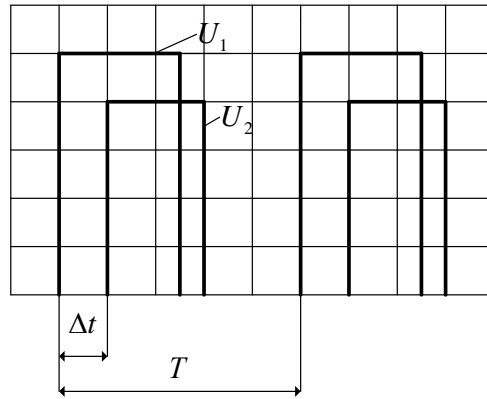


Рис. 14. Осциллограммы при измерении фазового сдвига

Измеряя интервалы времени ΔT и T , можно определить косвенным методом искомый фазовый сдвиг по формуле:

$$\varphi = \frac{\Delta T}{T} 360 \quad (2.1.2)$$

Пример. Найти фазовый сдвиг между двумя прямоугольными сигналами по осциллограмме, представленной на рис. 15.



$$C_Y = 2B / \text{дел}$$

$$D_P = 1 \text{ мс} / \text{дел}$$

Найти: $\Delta\varphi_{1,2}$

Рис.15 Осциллограмма для измерения фазового сдвига

Решение. $\Delta t = 1 \text{ мс}$, $T = 5 \text{ мс}$, $\varphi = \frac{\Delta t}{T} 360 = \frac{1}{5} 360 = 72^\circ$

Метод синусоидальной развертки. Пусть на входы X и Y осциллографа подаются исследуемые синусоидальные напряжения

$$U_x = U_{x\text{Max}} \sin(\omega t)$$

$$U_y = U_{y\text{Max}} \sin(\omega t + \varphi)$$

Развертка луча в этом случае осуществляется синусоидальным сигналом U_y .

Отклонения луча по координатным осям составят

$$x = U_{x\text{Max}} S_x \sin(\omega t) = a \cdot \sin(\omega t)$$

$$y = U_{y\text{Max}} S_y \sin(\omega t + \varphi) = b \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.1.3)$$

где S_x, S_y – чувствительности ЭЛО по каналам x и y. Размерность

$$[S_x] = [S_y] = \frac{\text{мм}}{B}.$$

Решая уравнения (2.1.3) совместно и исключая из них время t , получим уравнение траектории движения луча в плоскости XOY экрана ЭЛО:

$$y = \frac{b}{a} \left(x \cdot \cos \varphi + \sqrt{a^2 - x^2} \cdot \sin \varphi \right), \quad (2.1.4)$$

которое представляет собой обобщенное уравнение эллипса. Из

полученного выражения видно, что при $\varphi = 0^\circ, k\pi$, уравнение эллипса вырождается в прямую линию $y = \pm \frac{b}{a}x$. При $\varphi = 90^\circ$ получаем каноническое уравнение эллипса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

которое при $a^2 = b^2 = r^2$, т.е. при $U_{xMax}S_x = U_{yMax}S_y$, вырождается в уравнение окружности с центром в начале координат. Для определения фазового сдвига найдем параметры эллипса y_0 и y_m (рис 2.3).

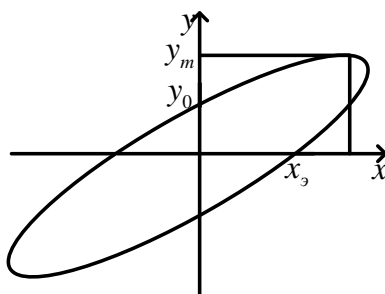


Рис.16. Определение параметров фигуры Лиссажу

Подставляя в (2.1.4) значение $x=0$, получим $y_0 = y|_{x=0} = b \cdot \sin(\varphi)$. Для определения y_m необходимо найти производную $\frac{\partial y}{\partial x}$, приравнять ее к нулю и из полученного уравнения найти значение x_0 , соответствующее экстремуму функции (2.1.4). Подставляя в уравнение (2.1.4) найденное значение x_0 , получим $y_m = b$, что приводит к уравнению $y_0 = y_m \cdot \sin(\varphi)$, откуда искомый фазовый сдвиг равен:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{y_0}{y_m}\right). \quad (2.1.5)$$

Очевидно, что погрешность измерения тем меньше, чем больше разность между y_m и y_0 . Поэтому метод применим для измерения малых значений фазового сдвига в диапазоне $0 \div 45^\circ$.

Нулевой метод измерения фазового сдвига Схема установки, реализующая нулевой метод измерения фазового сдвига представлена на рис.17. Установка содержит электронно-лучевой осциллограф, образцовый и вспомогательный фазовращатели φ_0 и φ_6 , а также ключи k_1 и k_2 .

Фазовращатель - это устройство, позволяющее вносить в электрическую цепь известный и регулируемый фазовый сдвиг, значение которого отсчитывается по шкале фазовращателя.

Перед измерением в установке устраняют собственный фазовый сдвиг, который вызван неидентичностью фазочастотных характеристик каналов вертикального и горизонтального отклонения. Для исключения собственного фазового сдвига указатели обоих фазовращателей устанавливают на ноль.

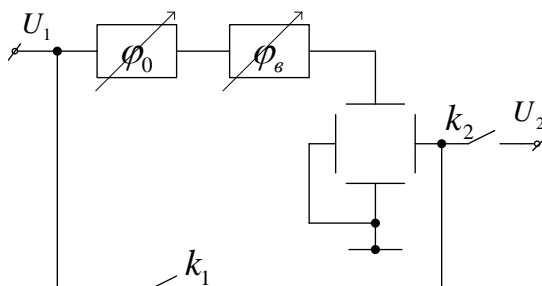


Рис.17. Компенсационная схема измерения фазового сдвига

Ключ k_1 замыкают, а ключ k_2 размыкают. На входы X и Y ЭЛО подается один и тот же сигнал U_1 . Усилитель вертикального отклонения находится в режиме максимальной чувствительности. Если на частоте измеряемого сигнала собственный фазовый сдвиг осциллографа равен нулю, то на экране наблюдается фигура Лиссажу в виде прямой линии. Если собственный фазовый сдвиг не равен нулю, то на экране наблюдаем эллипс, или его центральную часть в виде двух параллельных прямых (рис.18).

Регулировкой вспомогательного фазовращателя φ_c добиваются слияния двух линий в одну, что говорит о том, что вспомогательным фазовращателем скомпенсирован собственный фазовый сдвиг установки.

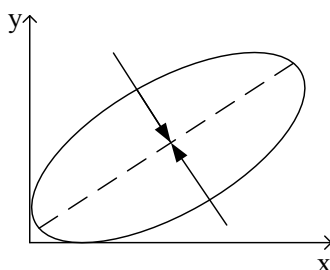


Рис. 18. Компенсация собственного фазового сдвига

После этого ключ k_1 размыкают, а ключ k_2 замыкают. На вход y подается сигнал u_1 , а на вход x - сигнал u_2 . На экране вновь образуется эллипс, соответствующий измеряемому фазовому сдвигу между сигналами u_1 и u_2 . Регулируя теперь образцовый фазовращатель, добиваются того, чтобы эллипс выродился в прямую. Это говорит о том, что с помощью образцового фазовращателя мы скомпенсировали фазовый сдвиг между сигналами u_1 и u_2 .

Результат измерения считывается со шкалы образцового фазовращателя, погрешность градуировки которой определяет точность измерений.

Измерение комплексного сопротивления. Для измерения параметров комплексного сопротивления воспользуемся схемой, представленной на рис.18,а.

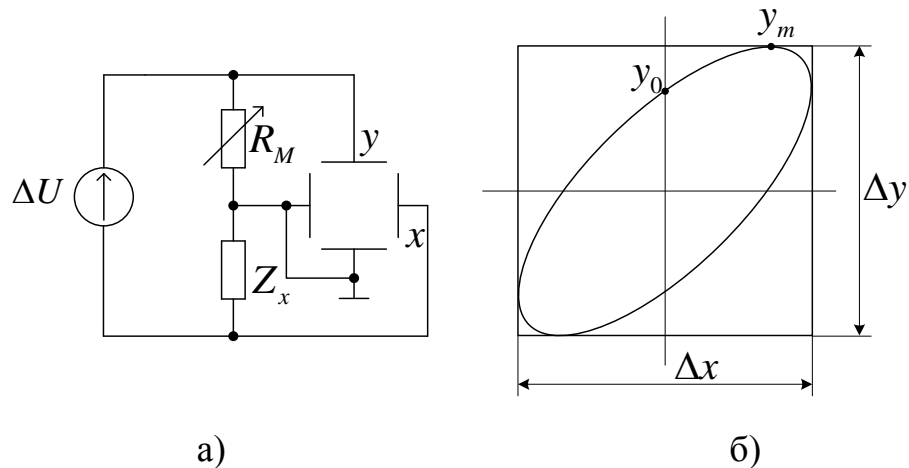


Рис.18. Структурная схема а) и осциллограмма б) для измерения комплексного сопротивления

Она содержит делитель напряжения, состоящий из регулируемого магазина сопротивления R_M и измеряемого комплексного сопротивления Z_x . Падения напряжения, снимаемые с этих сопротивлений относительно земли, подаются на пластины X и Y осциллографа. Поскольку сопротивление магазина носит чисто активный характер, а измеряемое сопротивление – реактивный, то падения напряжения на сопротивлениях R_M и Z_x сдвинуты по фазе на некоторый угол φ . В результате на экране ЭЛЮ формируется осциллограмма в виде эллипса (рис.18,б). Перед измерением в осциллографе устанавливают одинаковые чувствительности по каналам X и Y . Путем регулировки магазина R_M вписывают эллипс в квадрат так, чтобы $\Delta x = \Delta y$. В этот момент модуль комплексного сопротивления численно равен сопротивлению магазина $z_x = R_M \Big|_{\Delta x = \Delta y}$. Пользуясь изложенной выше методикой, можно по параметрам эллипса y_0 и y_m вычислить фазовый сдвиг между падениями напряжения на R_M и z_x :

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{y_0}{y_m} \right).$$

Тогда активная и реактивная составляющие измеряемого комплексного сопротивления могут быть рассчитаны по выражениям:

$$X = z_x \cdot \sin(\varphi),$$

или, с учетом выражения (2.1.5) $X = z_x \cdot \frac{y_0}{y_m}$. Тогда $R = \sqrt{z_x^2 - X^2}$.